

109-019-7B66
MOTC-IOT-108-H1DA001g

地層下陷與地下水位之關聯性 研析



交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月

109-019-7B66
MOTC-IOT-108-H1DA001g

地層下陷與地下水位之關聯性 研析

著者：謝幼屏

交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

地層下陷與地下水位之關聯性研析 / 謝幼屏著. -
- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 109. 02
面 ; 公分
ISBN 978-986-531-073-8(平裝)

1. 地層下陷 2. 地下水

354.7

108022788

地層下陷與地下水位之關聯性研析

著 者：謝幼屏

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587173

出版年月：中華民國 109 年 2 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 60 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：100 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•

電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010900104

ISBN：978-986-531-073-8 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

GPN : 1010900104

定價 100 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：地層下陷與地下水位之關聯性研析			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-073-8(平裝)	政府出版品統一編號 1010900104	運輸研究所出版品編號 109-019-7B66	計畫編號 MOTC-IOT-108-H1DA001g
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：謝幼屏 研究人員： 參與人員： 聯絡電話：(04)26587173 傳真號碼：(04)26564418			研究期間 自 108 年 01 月 至 108 年 12 月
關鍵詞：地層下陷、地下水位、關聯性分析			
摘要： 本所為防災應變、避免因地層下陷造成港區內各項設施的損壞，於臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣四地設置測站，長期蒐集地層下陷與地下水位資料。過去本所以土壤力學的耦合壓密理論、單向壓密理論為基礎，發展地層下陷模擬預測模式，在構建模式中為測求土樣各項參數，需投入大量人力與經費，在目前本所人力與經費有限的條件下，本研究嘗試運用迴歸分析法，僅依據土壤力學理論與本所既有監測資料，發展出迴歸模式，期能據以說明港區地層下陷與地下水位間的關聯性，並預測未來地層下陷的發展趨勢。惟由於各地測站的迴歸模式均未通過檢定，建議後續先查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性，重新選擇適當的變數以建立模式，之後再依序就各模式進行顯著性、配適度與妥當性檢定。			
研究成果效益： 測試運用迴歸分析法，僅依據土壤力學理論與本所既有地層下陷監測資料，發展出迴歸模式，來說明港區地層下陷與地下水位間的關聯性。可做為本所後續再建立地層下陷迴歸模式之先期研究。			
提供應用情形： 可提供交通部、航港局與港務公司，做為研究各港區地層下陷發展趨勢分析之參考。可做為本所辦理地層下陷、港區防災等相關研究後續探討與運用之參考。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
109 年 2 月	118	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Correlation Analysis of Land Subsidence and Groundwater Level			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-073-8(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010900104	IOT SERIAL NUMBER 109-019-7B66	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-108- H1DA001g
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Tsai Li-Hung PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsieh Yu-Ping RESEARCHER: PROJECT TECHNICIAN: PHONE: 04-26587173 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM January 2019 TO December 2019
KEY WORDS: Land Subsidence, Groundwater Level, Correlation Analysis			
Abstract: For the purpose of disaster prevention and emergency response, as well as preventing damage to various facilities in the port area due to land subsidence, we have set up monitoring stations in the four places which are Taichung Port, Budai Port, Anping Port and Dapeng Bay to collect long-term data on land subsidence and groundwater levels. The Institute of Transportation used to develop a prediction model for land subsidence simulation based on the coupled consolidation theory and one-dimensional consolidation theory in soil mechanics. In the construction model, a large amount of manpower and funds were required to measure the parameters of soil samples, while under the condition of limited manpower and funds, this study attempted to use regression analysis to develop a regression model barely based on soil mechanics theory and the existing monitoring data of land subsidence possessed by the Institute, with a view to explaining the correlation between the land subsidence and the groundwater level in the port area, as well as predicting the development trend of the land subsidence in the future. However, since the regression models of local stations have not passed the verification, it is advised that the correlation of each variable and the correlation of groundwater levels in each layer should be checked, and the appropriate variables should be selected again to establish the model, thereby proceeding with the tests of significance, goodness of fit and validity of each model in regular order. Benefits and Applications: Test the use of regression analysis to develop regression models barely based on soil mechanics theory and the existing monitoring data of land subsidence possessed by the Institute to explain the correlation between land subsidence and groundwater levels in the port area. It can be used as a preliminary study for the re-establishment of a regression model of land subsidence in the future. It provides the Ministry of Transportation and Communications, the Maritime Port Bureau and the Ports Corporation with a reference for the analysis of development trend of land subsidence in each port area. It can be used as a reference for the follow-up discussion and application of related research such as land subsidence and disaster prevention in the port area.			
DATE OF PUBLICATION Feb.2020	NUMBER OF PAGES 118	PRICE 100	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

地層下陷與地下水位之關聯性研析

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖目錄	VI
表目錄	VIII
第一章 緒論	1-1
1.1 研究緣起與動機	1-1
1.2 研究目的	1-1
1.3 研究範圍、對象與利害關係人	1-2
1.4 研究內容與方法	1-2
第二章 地層下陷影響因素探討	2-1
2.1 地層下陷行為	2-1
2.1.1 土體受壓來源	2-1
2.1.2 有效應力	2-2
2.2 超抽地下水之下陷	2-4
2.3 地表荷重之下陷	2-7
2.4 地震引起之下陷	2-11
第三章 地層下陷與地下水位監測資料說明	3-1
3.1 臺中港監測站	3-1

3.2 布袋港監測站	3-3
3.3 安平港監測站	3-12
3.4 大鵬灣監測站	3-14
第四章 地層下陷與地下水位之關聯模式建立	4-1
4.1 模式構建方法	4-1
4.2 地層下陷與地下水位迴歸模式	4-2
4.2.1 變數選擇	4-2
4.2.2 模式建立	4-5
4.3 各地測站的迴歸模式	4-6
4.3.1 臺中港迴歸模式	4-7
4.3.2 布袋港迴歸模式	4-8
4.3.3 安平港迴歸模式	4-9
4.3.4 大鵬灣迴歸模式	4-10
第五章 模式顯著性、配適度與妥當性檢定	5-1
5.1 檢定方法	5-1
5.2 各地測站的迴歸模式檢定	5-2
5.2.1 臺中港迴歸模式檢定	5-2
5.2.2 布袋港迴歸模式檢定	5-6
5.2.3 安平港迴歸模式檢定	5-10
5.2.4 大鵬灣迴歸模式檢定	5-14
5.3 檢定結果診斷	5-17
5.3.1 臺中港迴歸模式診斷	5-17
5.3.2 布袋港迴歸模式診斷	5-18

5.3.3 安平港迴歸模式診斷.....	5-18
5.3.4 大鵬灣迴歸模式診斷.....	5-19
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-4
6.3 研究成果之效益.....	6-4
6.4 提供政府單位應用情形.....	6-4
參考文獻.....	參-1
附錄一 期末審查意見及辦理情形說明表.....	附錄 1-1
附錄二 期末報告簡報資料.....	附錄 2-1

圖目錄

圖 1.1	研究流程圖	1-3
圖 2.1	覆土壓力計算示意圖	2-2
圖 2.2	摩擦力示意圖	2-3
圖 2.3	自由水位下降引致之有效應力增量分布	2-5
圖 2.4	受壓水位下降引致之有效應力增量分布	2-6
圖 2.5	填土荷重引致之有效應力增量分布	2-9
圖 2.6	結構物荷重引致之有效應力增量分布	2-10
圖 3.1	臺中港監測站位置圖	3-1
圖 3.2	臺中港監測站現況圖	3-1
圖 3.3	臺中港分層累積下陷量圖(200m)	3-2
圖 3.4	臺中港分層水位變化圖(手動量測)	3-3
圖 3.5	布袋港監測站位置圖	3-4
圖 3.6	布袋港 200m 監測站之分層累積下陷圖	3-5
圖 3.7(a)	布袋港分層水位變化圖(自記式)(86/7/22-92/08/14)	3-7
圖 3.7(b)	布袋港分層水位變化圖(自記式)(98/08/06-101/5/25)	3-7
圖 3.7(c)	布袋港分層水位變化圖(自記式)(102/10/8-106/10/30)	3-8
圖 3.8	布袋港 200m 分層水位變化圖(手動量測)	3-8
圖 3.9	布袋港 300m 監測站之分層累積下陷圖	3-9
圖 3.10	布袋港 300m 分層水位變化圖(手動量測)	3-10
圖 3.11	布袋港 400m 監測站之累積下陷量圖	3-11
圖 3.12	安平港監測站位置圖	3-12

圖 3.13	安平港分層累積下陷量圖(250m).....	3-13
圖 3.14	安平港分層水位變化圖(手動量測).....	3-14
圖 3.15	大鵬灣監測站位置圖	3-14
圖 3.16	大鵬灣分層累積下陷量圖(200m).....	3-15
圖 3.17	大鵬灣分層水位變化圖	3-16
圖 5.1	臺中港迴歸模式的常態機率圖	5-4
圖 5.2	臺中港迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖	5-4
圖 5.3	臺中港迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖	5-5
圖 5.4	臺中港迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖	5-5
圖 5.5	布袋港迴歸模式的常態機率圖	5-8
圖 5.6	布袋港迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖	5-8
圖 5.7	布袋港迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖	5-9
圖 5.8	布袋港迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖	5-9
圖 5.9	安平港迴歸模式的常態機率圖	5-12
圖 5.10	安平港迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖	5-12
圖 5.11	安平港迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖	5-13
圖 5.12	安平港迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖	5-13
圖 5.13	大鵬灣迴歸模式的常態機率圖	5-15
圖 5.14	大鵬灣迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖	5-16
圖 5.15	大鵬灣迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖	5-16
圖 5.16	大鵬灣迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖	5-17

表目錄

表 4-1	重大地震在本所下陷監測站的震度	4-5
-------	-----------------------	-----

第一章 緒論

1.1 研究緣起與動機

臺灣之西南沿海地區，包括雲林、嘉義與臺南等地區，其地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱，且壓密尚未全部完成，極可能因附近地區地下水抽取、大規模海埔新生地回填及結構物荷重或地震力等因素造成地層下陷，而影響公共工程及港區各項設施之安全。

一般來說，過度開發地下水資源、超抽地下水的行為，被認為是造成地層下陷的主要原因，因此本所為維護港區工程及各項設施之安全，在臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等四個地區內設置地層下陷與地下水壓監測站，長期蒐集地層下陷、地下水壓資料，進行持續性的監測。本計畫以此一長期監測資料為基礎，針對地層下陷與地下水位之關聯性，做深入的分析探討。

期以臺灣本土的長期實測數據述明地層下陷與地下水位的具體關係，更明確掌握各地區之地層下陷未來可能發展態勢，並將研究成果提供交通部、航港局、港務公司等相關單位參考，以提早因應與預作準備。

1.2 研究目的

本研究的研究目的係將本所進行的地層下陷監測資料做進一步深入分析，以實際監測資料建立具有顯著性、配適度與妥當性的迴歸模式，具體說明臺灣西南地區地層下陷與地下水位間的關聯性，並預測未來地層下陷的發展趨勢。研究成果可提供交通部、航港局與港務公司參考，做為確掌各港區地層下陷發展趨勢，以防災應變，提早因應準備之用。

具體的研究目標包括：

- 1.地層下陷影響因素探討
- 2.地層下陷與地下水位監測資料說明
- 3.地層下陷與地下水位之關聯模式建立
- 4.模式之顯著性、配適度與妥當性檢定分析
- 5.地層下陷之未來發展趨勢分析與評估
- 6.各地區地層下陷程度之差異性分析

1.3 研究範圍、對象與利害關係人

本研究依據此一長期監測資料進行地層下陷與地下水位之關聯性研析，故研究以本所設置監測站的臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等四個地區為研究範圍，以地層下陷與地下水位的長期監測資料為研究對象。

基於港口地區若發生地層下陷，主要將造成港區內各項設施毀損，進而影響港區安全，而港口的主管機關為交通部，以及部屬單位航港局、港務公司，因此，此一研究案的利害關係人為上述單位。執行此一研究案之成果可供上述單位參考引用，以防災應變、避免因地層下陷造成港區內各項設施的損壞。

1.4 研究內容與方法

本研究的研究內容如圖 1.1 的流程圖所示。

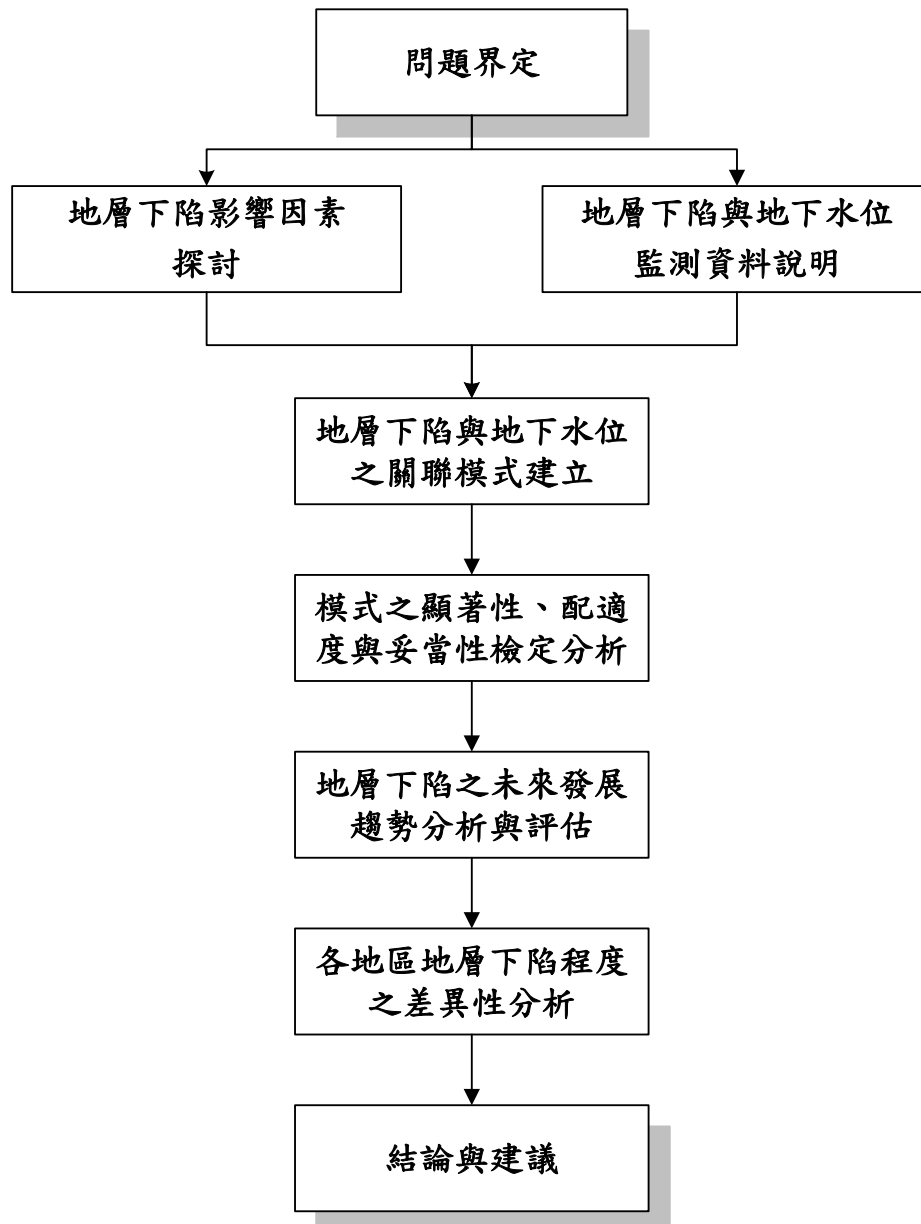


圖 1.1 研究流程圖

首先，在第一章進行問題的界定，說明研究動機、研究目的、研究內容與方法。

然後，在第二章進行地層下陷影響因素探討。大部分地層下陷多因過量開發地下水資源而造成，但地層下陷尚受到其他因素影響，如大地應力作用、地震作用、結構物荷重、填土荷重等。不同影響因素造成土層的壓縮現象不同，在分析地層下陷與地下水位之關聯性前，有必要了解各影響因素造成的下陷行為與壓縮特性，以做為後續分析

之理論依據。

接下來，在第三章研析地層下陷與地下水位的監測資料。說明本所在臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等四個地區設置監測站的位置、監測資料的蒐集方法、蒐集期間、數據內容與前期研究既有成果。

在第四章建立地層下陷與地下水位之關聯模式。依據本所於各地區監測站蒐集到的原始測量數值，經分析後計算出各監測站的地層下陷量與地下水位值。地層下陷量包括總下陷量與分層下陷量，地下水位值包括各層地下水位值。進而嘗試運用統計軟體，找出各地區各層地層下陷量與相對應之地下水位值的關聯模式。

在第五章進行各關聯模式之顯著性、配適度與妥當性檢定分析，以確認模式妥當與否。若模式不妥當，則重新檢視模式，考慮是否納入其他影響因素？是否改用非線性模式？是否原始資料中有離群值？或有其他影響因變數存在。

後續則進一步評估與分析地層下陷之未來發展趨勢。於前述章節找到適當模式後，則進而推估未來地層下陷的可能變化，評估各地區之地層下陷未來可能發展態勢，以防災應變，避免因地層下陷造成港區內各項設施的損壞。並進行各地區地層下陷程度之差異性分析。比較臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等四個地區間地層下陷的差異。

最後，在第六章做一綜合整理之結論與建議。期能更明確掌握各地區之地層下陷未來可能發展態勢，並將研究成果提供交通部、航港局、港務公司等相關單位做為港區防制地層下陷、土壤液化等災害之參考。

在研究方法上，關於地層下陷影響因素探討，將採用文獻分析法辦理，透過蒐集地層下陷、地下水位相關文獻與參考資料，將地層下陷的成因與理論依據做一綜整分析。關於地層下陷與地下水位監測資料說明，將按現況分析方法，具體說明各地監測站的監測資料。

關於地層下陷與地下水位之關聯模式建立、模式檢定與未來趨勢分析等工作，將採用迴歸分析法，運用統計軟體建立各地區之地層下陷與地下水位的關聯模式，進行各關聯模式的顯著性、配適度與妥當性檢定分析，然後推估未來地層下陷的可能變化情形。

第二章 地層下陷影響因素探討

大部分地層下陷多因過量開發地下水資源而造成，但地層下陷尚受到其他因素影響，如大地應力作用、地震作用、構造物荷重、填土荷重等。不同影響因素造成土層的壓縮現象不同，在分析地層下陷與地下水位之關聯性前，有必要了解各影響因素造成的下陷行為與壓縮特性，以做為後續分析之理論依據。在本章 2.1 節，先從土壤力學觀點說明土壤受到壓力造成地層下陷行為的理論；然後在 2.2~2.4 節分別說明超抽地下水、地表荷重、地震作用等造成地層下陷的影響因素。

2.1 地層下陷行為

無論是超抽地下水、地表荷重增加，或是地震作用影響所造成的地層下陷，從土壤力學的觀點來看，根本原因都是土壤受到壓力，也就是說土體在土層中受到比原來存在土層中有效應力更大的應力而產生壓縮。

由於土壤材料包含固體的土粒、液體和氣體等三相，當土壤受力時，空氣可被壓縮，但土粒與水幾乎不能被壓縮，因此土壤受壓變形的行為是：當土壤受壓後，內部的孔隙水及空氣逐漸排出，造成土壤越壓越緊密(壓密)，土體愈來愈縮小。此一土壤壓密現象，將使地層表面產生沈陷或變形，也就是所謂的地層下陷。為了說明土壤受到壓力造成地層下陷的行為，本節先說明土壤受壓的主要來源，以及分析地層下陷問題的主要工具：有效應力。

2.1.1 土體受壓來源

土體中的應力，依其來源可分為覆土壓力與外加應力 2 類。其中，覆土壓力即是土壤自重的應力，除覆土壓力外之其他使土體應力增加或減少及造成變形者，均屬於外加應力。一般而言，無論是超抽地下水、

填土荷重或構造物荷重造成之地層下陷，大都因土層受到外力而產生壓縮所致，屬外加應力。

所謂的覆土壓力係指土壤自重的應力，定義為某深度由其上土壤的重量所作用的應用。其應力計算方式如下：

若為均質土壤，則在深度 Z 的覆土壓力 σ_{vo} ，為該深度單位面積上土柱的重量，即

$$\sigma_{vo} = \gamma_m Z \dots\dots\dots(\text{式 2.1})$$

其中 γ_m ：土的單位重($=2 \text{ t/m}^3$)， Z ：自地表面以下的深度，如圖 2.1 所示。

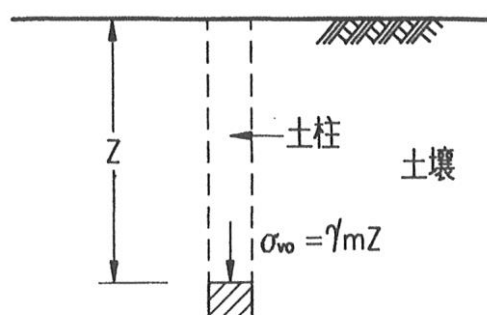


圖 2.1 覆土壓力計算示意圖

若為層狀土壤，則覆表壓力 σ_{vo} 為各層土壤之單位重與各層土壤厚度兩者相乘之總和，即

$$\sigma_{vo} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \dots\dots\dots(\text{式 2.2})$$

其中 $\gamma_1 \dots \gamma_n$ ：各層土壤之總體單位重， $h_1 \dots h_n$ ：各層土壤之厚度；

n ：層狀土壤的層數。

2.1.2 有效應力

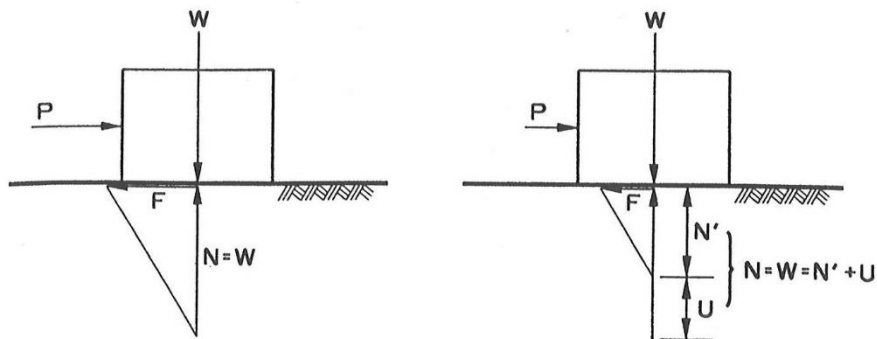
當重量 W 的物體在固體面上(如桌面)受到推力 P 的作用時，界面

同時會激發摩擦力 F ，摩擦力 F 的大小與反作用力 $N(N=W)$ 的大小有關 ($F=\mu N$ ， μ 為摩擦係數)，如圖 2.2(a) 所示。當物體在土壤上受到推力 P 的作用時，由於土壤材料包含固體的土粒、液體的水和氣體的空氣等三相，其中的水和空氣不能提供摩擦力，只有土粒能夠提供摩擦力，則界面激發的摩擦力係由土粒所提供。假設 N' 為土粒提供的反作用力 U 為水與空氣所承受的壓力，則摩擦力 F 的大小與土粒提供的反作用力 N' 的大小有關 ($F=\mu N'$ ， μ 為摩擦係數)，如圖 2.2(b) 所示。

此一土壤中土粒所提供的反作用力，稱為有效反作用力。由 $N=W=N'+U$ ，可知 $N'=N-U$ ；進一步，按應力為單位面積所承受的作用力，可將作用力轉換為應力， $\frac{N'}{A} = \frac{N}{A} - \frac{U}{A}$ ，令 $\sigma' = \frac{N'}{A}$ ， $\sigma = \frac{N}{A}$ ， $u = \frac{U}{A}$ ，可以得到

$$\sigma' = \sigma - u$$

式中 σ' ：有效應力； σ ：總應力； u ：孔隙壓應力。



(a)在固體面上的摩擦性質

(b)在土壤中的摩擦性質

圖 2.2 摩擦力示意圖

2.2 超抽地下水之下陷

超抽地下水引致地層下陷，一般可分為二類，一為自由水位下降引致之淺層沉陷，另一為受壓水位下降引致之深層沉陷。超抽地下水引致之沉陷，不論是超抽自由水層或受壓水層，由於其影響之區域範圍均很廣大，因此其沉陷特性屬於區域沉陷，亦由於屬於均勻沉陷，一般均不易察覺，往往等到發生海水倒灌、排水情況惡化等災害時，才察覺到地層下陷。

若由於自由水層受到過量抽水，引致自由水位下降，其有效應力增量僅分布於最淺層自由水層及其下之難透水層(Aquitard)或粘土層，而其他之受壓水層(Aquifer)及粘土層則無有效應力增量產生，其分佈情形如圖 2.3 所示，由於在有效應力增量存在之土層，才有土壤之壓密或壓縮現象，因此超抽自由水層產生之沉陷屬於淺層沉陷。

若地層下陷是由於自由水層超抽地下水而引起者，則其沉陷主要來源，為自由水層中砂土之立即壓縮，及自由水層中夾層粘土全面排水之壓密，與自由水層下一層難透水粘土層之單向、受壓之壓密現象。

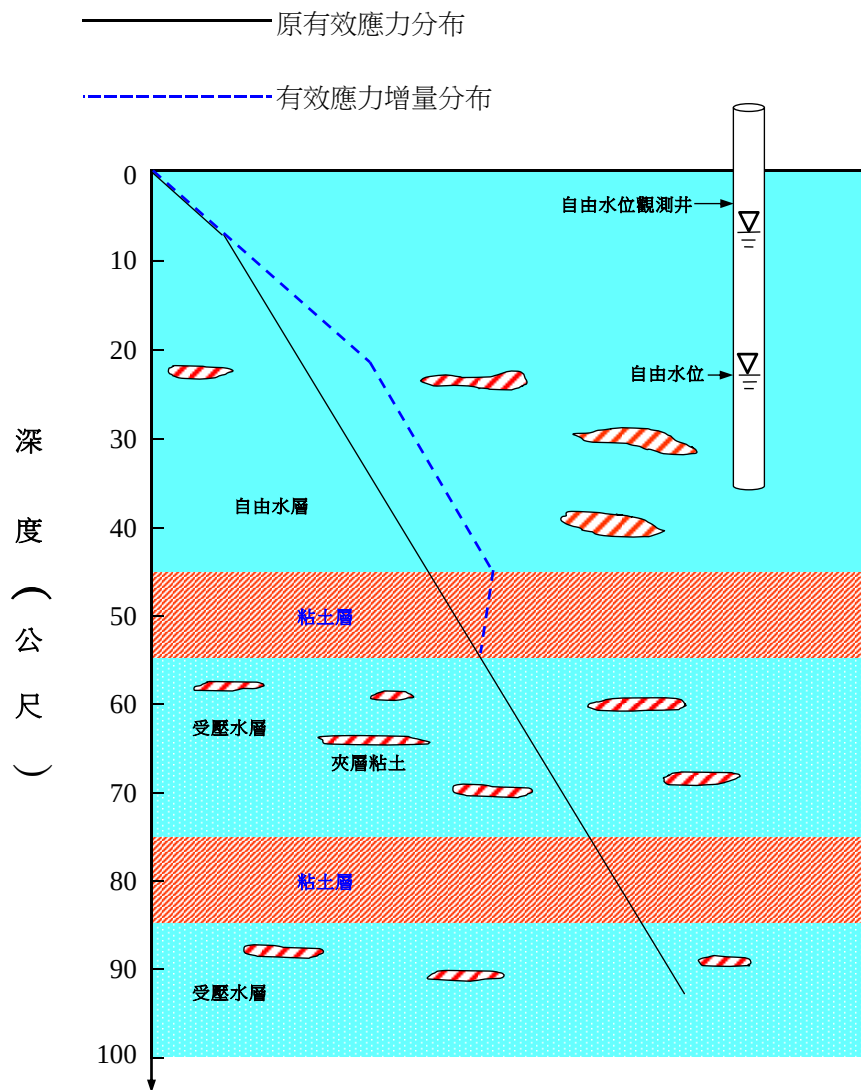


圖 2.3 自由水位下降引致之有效應力增量分布

若由於受壓水層受到過量抽水，而致受壓水位下降，其有效應力增量如圖 2.4 所示，除分布於該超抽受壓水層外，並分佈於其上下之難透水層或粘土層，而最淺層之自由水層及其他之受壓水層與粘土層則無有效應力增量產生，由於超抽受壓水層引致之有效應力增量產生於土層深處，土壤之壓密或壓縮亦發生於深處，因此此種沉陷屬於深層沉陷。

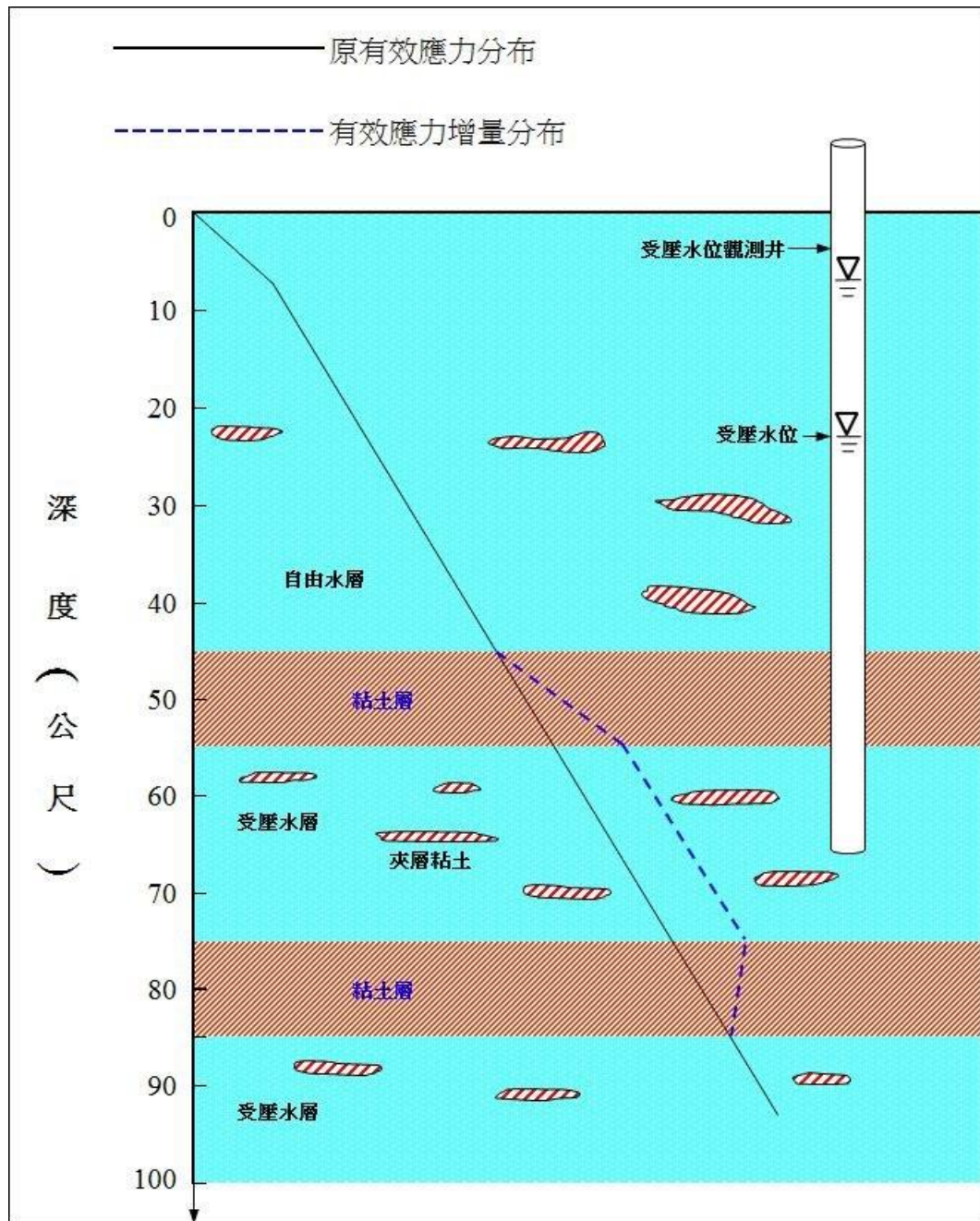


圖 2.4 受壓水位下降引致之有效應力增量分布

大部分海岸地層下陷皆因過量抽取受壓含水層中地下水而產生之沉陷，此種沉陷不但其影響達於土層深處，更由於其沉陷主因，是土層深處之受壓含水層及其上下之難透水層或粘土層，受壓縮而產生地層下陷，故稱為深層沉陷(Deep subsidence)，此種沉陷行為，相當於一水力起重機(Hydraulic jack)將荷重舉高後突然水壓力減少時之情形，此時荷重即漸漸下降。在發生區域沉陷時，主要因受壓含水層中水壓因過度

抽取地下水而下降，受壓含水層及其上下之粘土層受到壓縮，此稱為受壓縮土層，而此受壓土層至地表面間之土層並未受到壓縮，只是整體隨受壓縮土層之壓縮而向下移動產生地層下陷，故地面之沉陷與受壓含水層中水壓之減少量成正比。當地下水繼續超抽時所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為活性沉陷(Active subsidence)。當過量抽水已遏止，地下水壓已趨穩定後，地面之沉陷並不立即停止，而仍將持續一段時間，惟其沉陷速率隨時間而漸趨緩和，最後始停止，此期間所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為「稽延沉陷」(Lag subsidence)或「殘餘沉陷」(Residual subsidence)，通常在活性沉陷後，殘餘沉陷仍將繼續數十年，而後沉陷方可認為全部停止。

在整個壓縮之土層中，受壓含水層中之砂土層為立即壓縮，即在超抽受壓含水層之地下水位下降時，立即壓縮，此為活性沉陷之主要部分。受壓含水層中亦含有大部分之夾層粘土(Interbeds)，由於含水層之水流是互通的，因此夾層粘土產生全面排水之壓密沉陷，其壓密速率較快，夾層粘土之厚度，雖然很薄，但受壓含水層中有多層夾層粘土，累積之總壓密沉陷量亦很可觀，此夾層粘土之沉陷影響部分之活性沉陷量及大部分初期之稽延沉陷。

受壓含水層上下之難透水粘土層，雖為高壓縮性之土壤，但在受壓含水層過量超抽地下水時，產生單向受壓之壓密沉陷，其總沉陷量為雙向受壓沉陷之一半而已，且其土層較厚，壓密速率極慢，對活性沉陷影響極微，為稽延沉陷之主要來源。

2.3 地表荷重之下陷

當土壤承受荷重，例如填土工程或建造結構物時，土壤將發生變形，由於荷重造成表面垂直總變形量即為沉陷。在工程結構基礎設計中，由於荷重增加所造成的沉陷量，是否於允許變形範圍值，也是我們需要進行評估的一項，過度的沉陷量皆會造成結構性或其它的損害，尤其是沉陷發生的速度很快時更易發生。

於原有地層上進行填土或興建結構物工程，除了要進行穩定性分析外，還需估算沉陷量是否於允許變形範圍內，或採取地質改良以減少沉陷量的產生。土層在荷重作用下，總沉陷變形量，依據沉陷的順序與原因可分為即時沉陷、主要壓密沉陷、次要壓密沉陷等三種，分別簡述如下：

1. 即時沉陷：即時沉陷是受載重後在很短時間內發生，是土粒的彈性變形或局部性重排，引起土粒的側向擠出使土體壓縮為主。即時沉陷實際上不為彈性但通常以彈性理論估算，在設計淺基礎工程時必需考慮。
2. 主要壓密沉陷：土壤在荷重作用下產生超額孔隙水壓，隨時間的進行，超額孔隙水壓將逐步消散，土粒間的孔隙水被排出，土體體積因而縮小而使地表產生沉陷，主要壓密沉陷的計算對總沉陷及完工沉陷量影響最大。
3. 次要壓密沉陷(secondary compression)：次要壓密沉陷通常發生於高壓縮性之軟弱粘土層或有機質土壤，於主要壓密完成後在有效應力維持不變之狀況下，隨時間而持續發生之沉陷，又稱二次壓縮。此種沉陷可能是由粘土顆粒與粘土團間鍵結的壓縮土壤結構重組所造成。

填土與建造結構物也會因為荷重的增加，土壤受壓力作用後，土壤孔隙中的水份及空氣被擠壓而向外排出，孔隙因而減少，顆粒排列變得更緊密，土壤因壓縮變形後將造成基礎的沉陷，其有效應力增量分布情形如圖 2.5 與圖 2.6 所示。

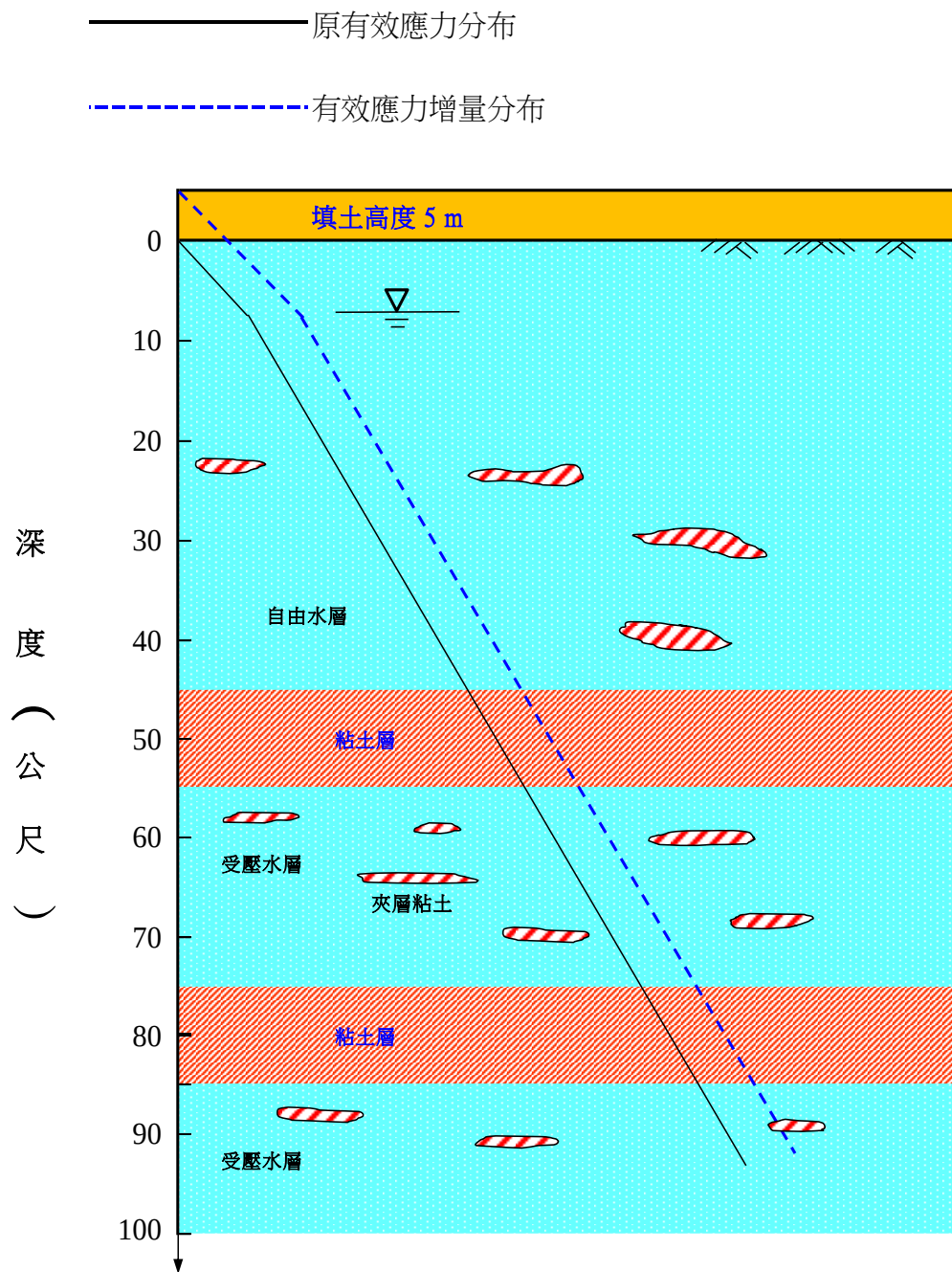


圖 2.5 填土荷重引致之有效應力增量分布

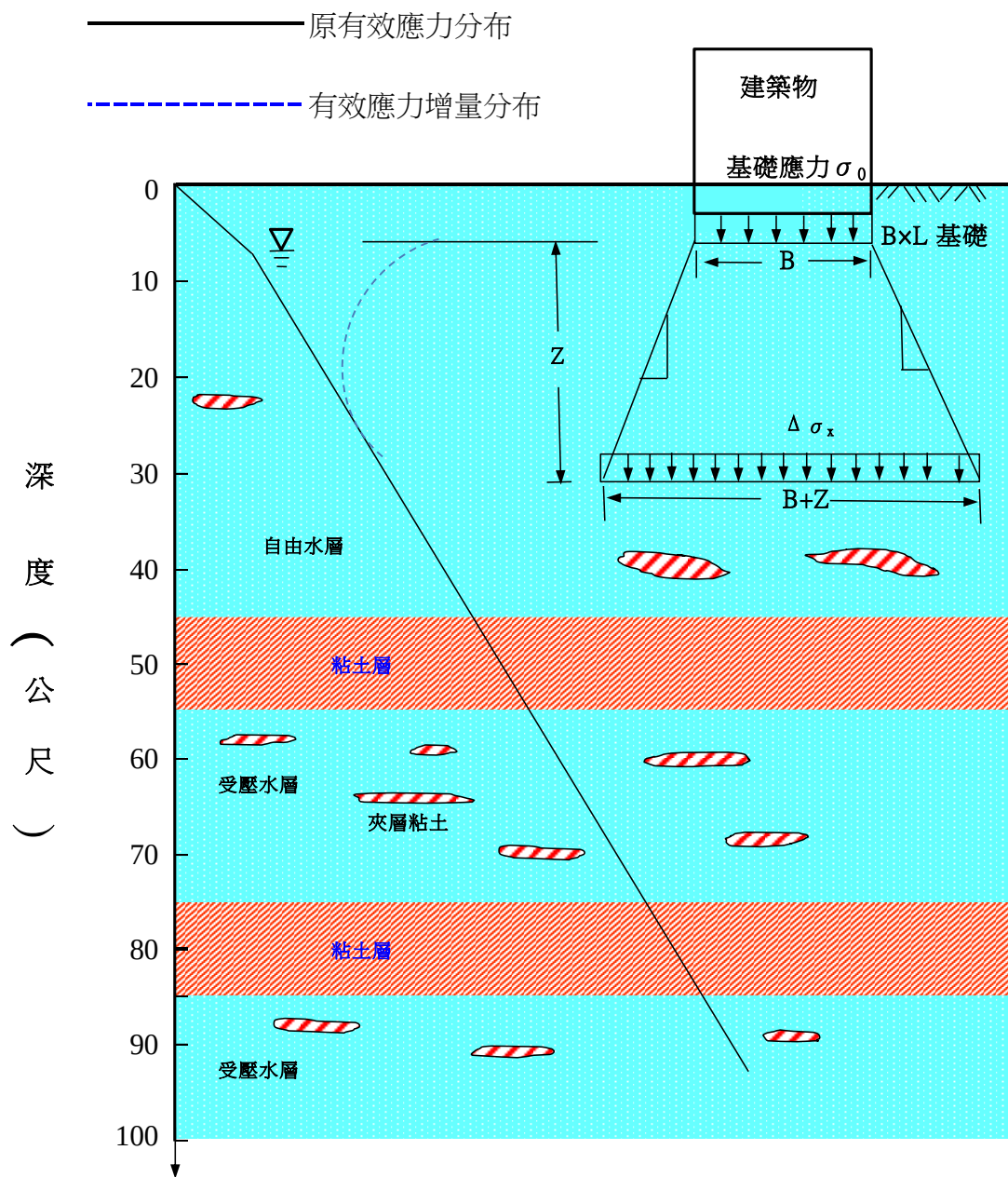


圖 2.6 結構物荷重引致之有效應力增量分布

除了填土或建造結構物引起的沉陷外，基礎工程施工常使用樁基方式以傳遞上部結構物載重達到土層中所產生的沉陷也需考慮。單樁之載重支承力，一般可依其樁身摩擦力及樁尖支承力來估算，但決定群樁之載重支承力是非常困難的問題，這是因各樁之安置距離相近，因此群樁傳遞至土壤之應力會重疊，而將減低樁的總體支承力，理想情況是經過設計安排後之一組群樁，其總體的之承力應不小於單一樁體支承

力總和。

群樁除了有群樁支承力效率要考慮外，尚有群樁貫入粘土層中的壓密沉陷與負表面摩擦力產生的沉陷也需一起評估。此外，群樁的壓密沉陷可能附近的填土，相接樓板載重及降低地下水位等因素而產生。

2.4 地震引起之下陷

由於基礎底面以下之土壤，在受到地震之動態作用力時，將使土壤產生體積壓縮，引致基腳沉陷，一般砂土層於承受震動時，均有趨於緊密之現象，對於乾燥或低飽和之砂土，因孔隙中空氣迅速被壓縮及擠出，而立即產生體積壓縮現象。對於飽和之砂土，因孔隙水無法立即排出，而有孔隙水壓累積增大現象，俟震動過後，則隨著超額孔隙水壓之消散，有再壓密現象而產生體積壓縮。此外，飽和之粘土，在受到震動時，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象發生，唯其孔隙水壓消散較慢，乃發生長期沉陷，且其沉陷量較砂土層為大。

現地土壤承受反覆荷重作用所產生的壓密和液化問題，是值得研究的問題。土壤液化後，在孔隙水壓消散過程將使得土壤產生壓密現象而使基礎結構物產生超額之差異沉陷，致使結構物發生破壞或傾斜。

探討現地土壤因受到地震作用引致液化所產生之土層沉陷來源，經蒐集相關參考文獻約有 4 種，分別簡述如下：

1. 乾燥或飽和但能充分排水的砂土，因振動作用而有壓實的產生。
2. 若砂土為飽和且未能排水，則在振動作用期間產生的殘留變形。
3. 在振動停止後，超額孔隙水壓消散使砂土再壓密造成沉陷。
4. 飽和粘土在承受反復剪力載重後，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象，而發生長期沉陷。

第三章 地層下陷與地下水位監測資料說明

本所為維護港區工程及各項設施之安全，在臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等 4 個地區內設置地層下陷與地下水位監測站，長期蒐集地層下陷、地下水位資料，進行持續性的監測。在本章 3.1~3.4 節分別說明 4 地區監測站現況與各站監測資料，資料引用自本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」(陳志芳、謝明志，2019)報告。

3.1 臺中港監測站

臺中港監測站設置在臺中港 26 號碼頭後線的綠地，位置與現況如圖 3.1 與 3.2 所示。監測站內設置監測井 2 孔，包括地層下陷監測井 1 孔，地下水位監測井 1 孔。監測井與監測資料說明如下。



圖 3.1 臺中港監測站位置圖



圖 3.2 臺中港監測站現況圖

1.地層下陷監測井與監測資料

地層下陷監測井為深度 200m 的電磁式分層地層下陷監測井，共設置 17 個沈陷感應磁環，分別位在深度 0、3、10、18、27、31、54、73、90、110、138、157、164、179、181、189、199 m 之位置。

該監測井自民國 88 年 6 月開始量測，而 94 年 8 月起因儀器卡管，故累積沉陷量僅能自地表量測至 181m 深，累積總沉陷量至民國 106 年 7 月止約為 5.8 公分，其中自 0~90 m 深之沉陷量約 4.6 公分，將近占總沉陷量 80%，其間以民國 88 年 9~10 月，因地震產生之總沉陷量 3.2 公分最多，而民國 88 年 10 月~98 年 11 月止，總沈陷量為 1.8 公分。如圖 3.3 所示。

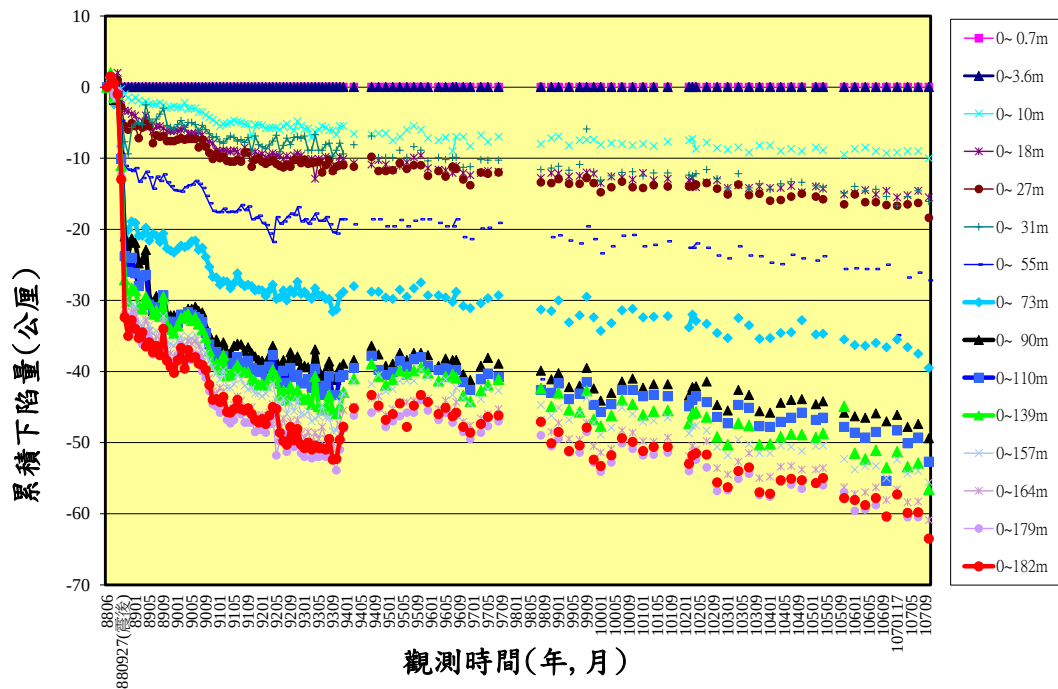


圖 3.3 臺中港分層累積下陷量圖(200m)

2.地下水位監測井與監測資料

地下水位監測井為 200 m 深之分層水壓觀測井，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 29 m、63 m、100 m、145 m、173 m，自動量測資料自 88 年 6 月 29 日起至 91 年 6 月 7 日止，因儀器故

障而改以手動量測。手動量測自 88 年 7 月開始，每月量測一次。94 年起，改以每兩個月量測一次，97 年 8 月至 98 年 8 月因水位井卡管而缺記錄，資料記錄截至 106 年 7 月止，其結果如圖 3.4 所示。

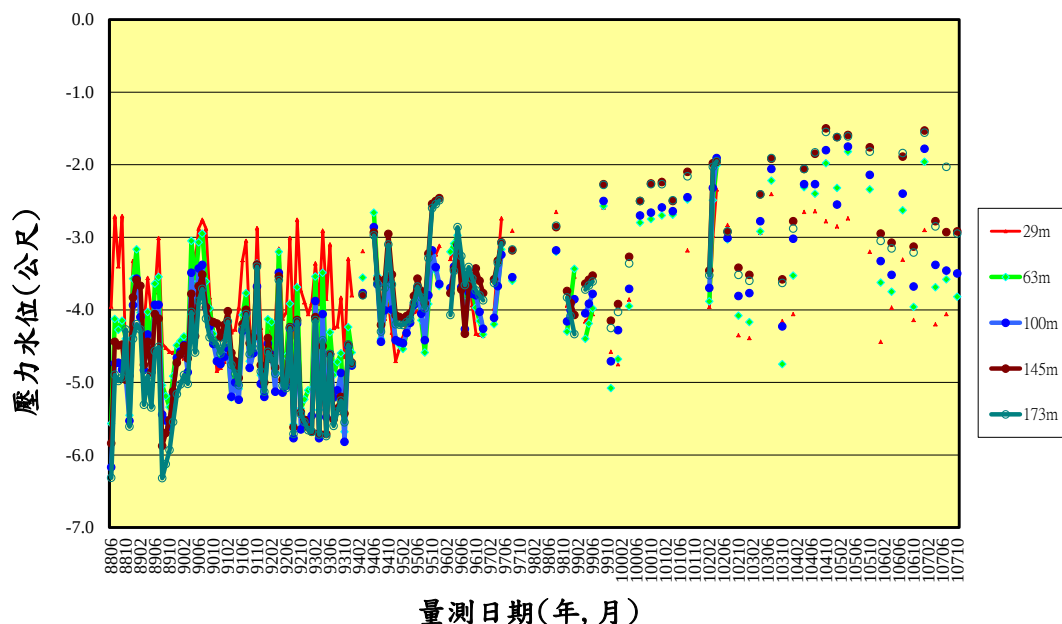


圖 3.4 臺中港分層水位變化圖(手動量測)

因臺中港受到 921 大地震影響，導致港區 1~4 號碼頭有液化現象，地下水壓監測站亦取得記錄，如 88 年 9 月 21 日 00 時 00 分之各分層水位原約於-3~-5 m，地震後 9 月 21 日 06 時 00 分之各分層水位約為-0.2 m，因地震時間為 9 月 21 日 01 時 47 分，故印證各層水位是因地震後才上升。

3.2 布袋港監測站

布袋港區自民國 86 年起逐年於港區之適當位置設置監測站，共設置 3 個監測站，分別是 200 m 監測站、300m 監測站與 400m 監測站。200 m 監測站選擇位於港區第二期海埔地之西北角隅，300m 監測站位於商港近南堤之砂石碼頭區，400m 監測站於 92 年設置在商港區的西北角隅，如圖 3.5，各監測站分別敘述如下。



圖 3.5 布袋港監測站位置圖

1. 200 m 監測站

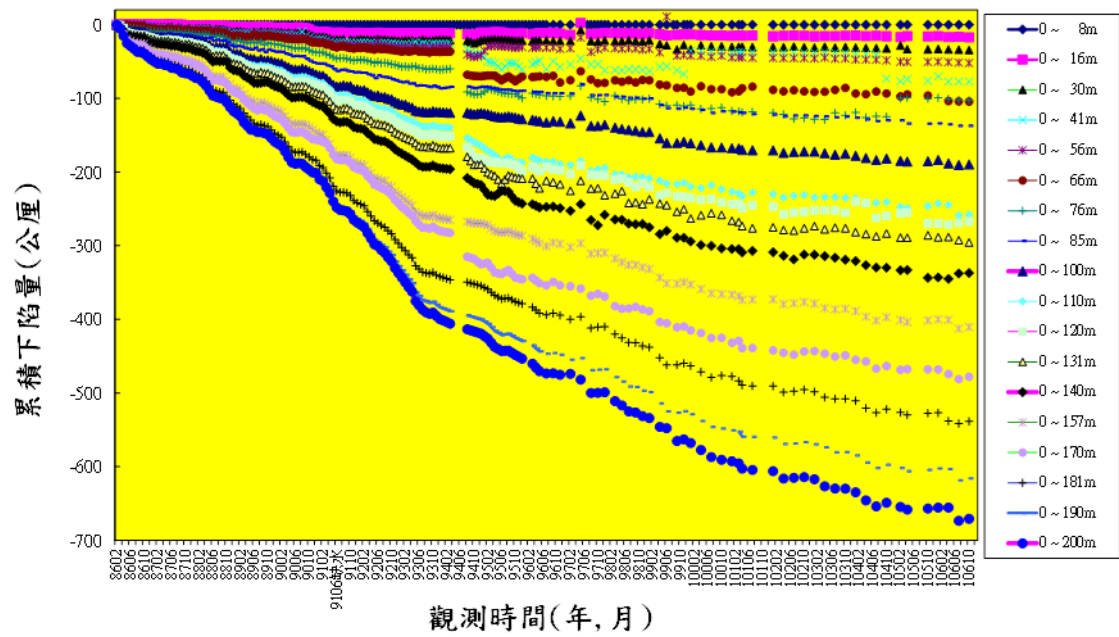
在 200m 監測站內設置監測井 3 孔，包括地層下陷監測井一孔，地下水位監測井 2 孔(含電子式水壓計及開口式水壓計)，並採用手動及自動記錄方式。

(1) 地層下陷監測井與監測資料

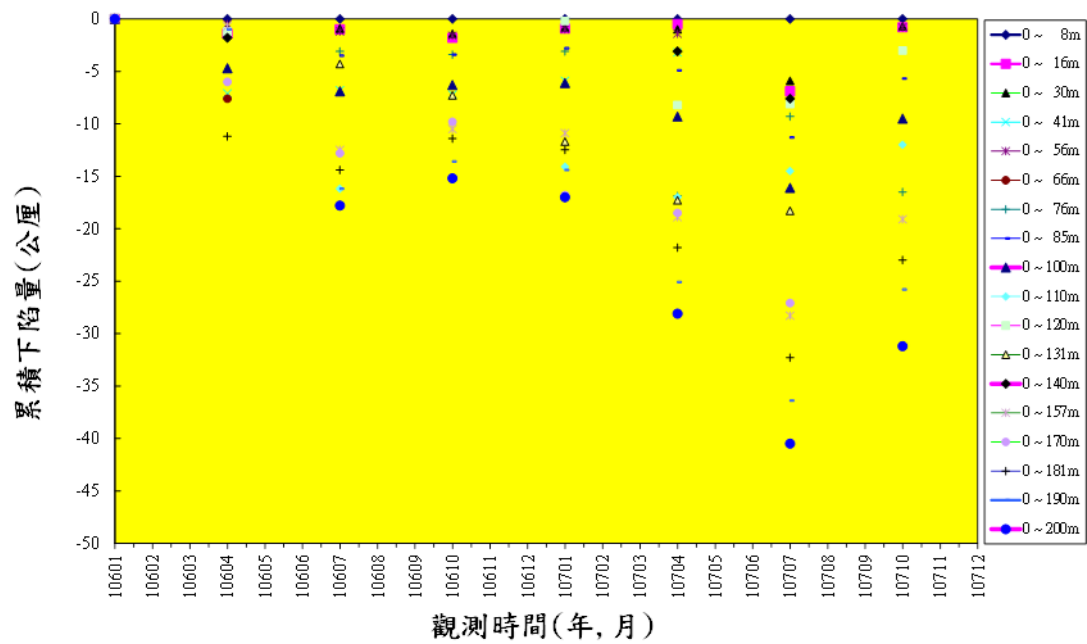
地層下陷監測井為深度 200m 的電磁式分層地層下陷監測井，共設置 18 個沈陷磁環，分別位在深度 8、16、30、41、56、66、76、85、100、110、120、131、140、157、170、181、190、200 m 之位置。

該監測井自民國 86 年 2 月開始量測，圖 3.6(a)(b)為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200m 感應磁環之累積曲線比較圖。圖中顯示：從 86 年 2 月~107 年 10 月之 21 年 8 個月期間，布袋港地表下 8~200m 間之沈陷總量約為 70cm，而其中 140~200m 間之沈陷量約 34cm，占總沈陷量之 48%以上，由此資料顯示，布袋港之沈陷屬於深層沈陷，且較 200m 更深之處仍可能有沈陷發生，因此，布袋港之總沈陷量應比監測井所量測之壓

縮總量還大。



(a) 86 年 2 月~106 年 10 月



(b) 106 年 1 月~107 年 10 月

圖 3.6 布袋港 200m 監測站之分層累積下陷圖

(2) 地下水位監測井與監測資料

在 200 公尺監測站處，設置 2 孔水壓監測井，共埋設 7 支水壓計，其深度分別為 34 m、44 m、68 m、105 m、131 m、143 m、178 m，自 86 年 7 月 22 日起至 107 年 6 月為自動量測系統資料(圖 3.7(a)~3.7(c))，量測期間曾因儀器故障而資料中斷，茲將分層地下水壓 (t/m^2) 正規化為分層地下水位 (m) 以利比較。發生於民國 99 年 3 月 4 日 8 時 18 分的甲仙強烈地震，布袋港 200m 水壓自動監測站於 3 月 4 日中午 12 時亦成功的記錄到超額之孔隙水壓資料，如圖 3.7(b)。由於其中 34 m、105 m、143 m、178 m 之水壓計為開放式，故採手動量測，手動量測自 86 年 4 月至 107 年 6 月止，每月定期量測一次，自 94 年 1 月起因人力有限，故每 2~3 個月量測一次，99 年 1 月起，每 3 個月量測一次，資料不足的部份以內插法補充，量測結果如圖 3.8 所示。

由 200m 地下水位圖顯示，105 m 處之水位變化極大，最高水位-16 m，最低水位-27.6m，降雨量較少時，水位明顯降低。131 m 處之水位變化亦很大，最高水位-15.7 m，最低水位約為-20.7 m，其水壓大小及變化與 105 m 處屬同一含水層，143 m 及 178 m 水位大小及變化亦很相當，亦屬同一含水層，其最高水位為-17.8 m，最低水位為-26 m，其變化與 105m、131 m 處相似。

綜合各地層之地下水位資料，布袋港水層約可分為 4 個層次，深度 34 m 之水位為第 1 含水層之水位，深度 44 m、深度 68 m 之水位為第 2 含水位，深度 105 m 及深度 131 m 之水位為第 3 含水位，深度 143 m、深度 178 m 之水位為第 4 含水位。由水位變化現象顯示，第 1、2 層水位變化較小，較無超抽地下水現象，第 3、4 層地下水位低且變化極大，超抽地下水現象明顯，而且以旱季時，水位相對較低，表降雨量減少時，超抽地下水更為嚴重。

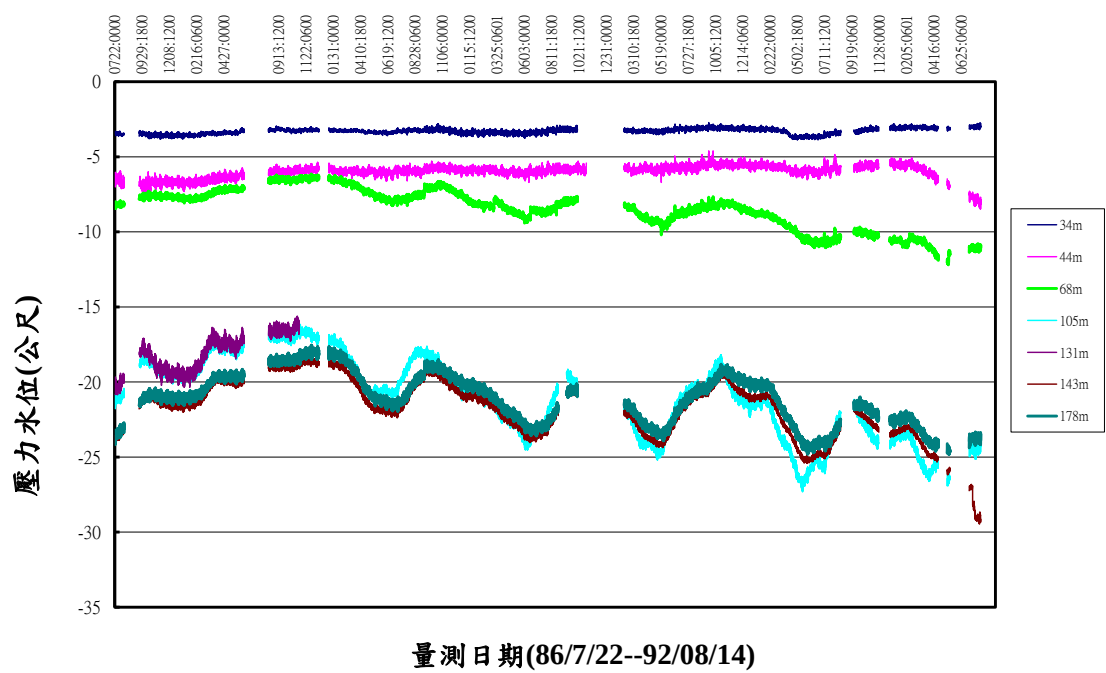


圖 3.7(a) 布袋港分層水位變化圖(自記式)(86/7/22-92/8/14)

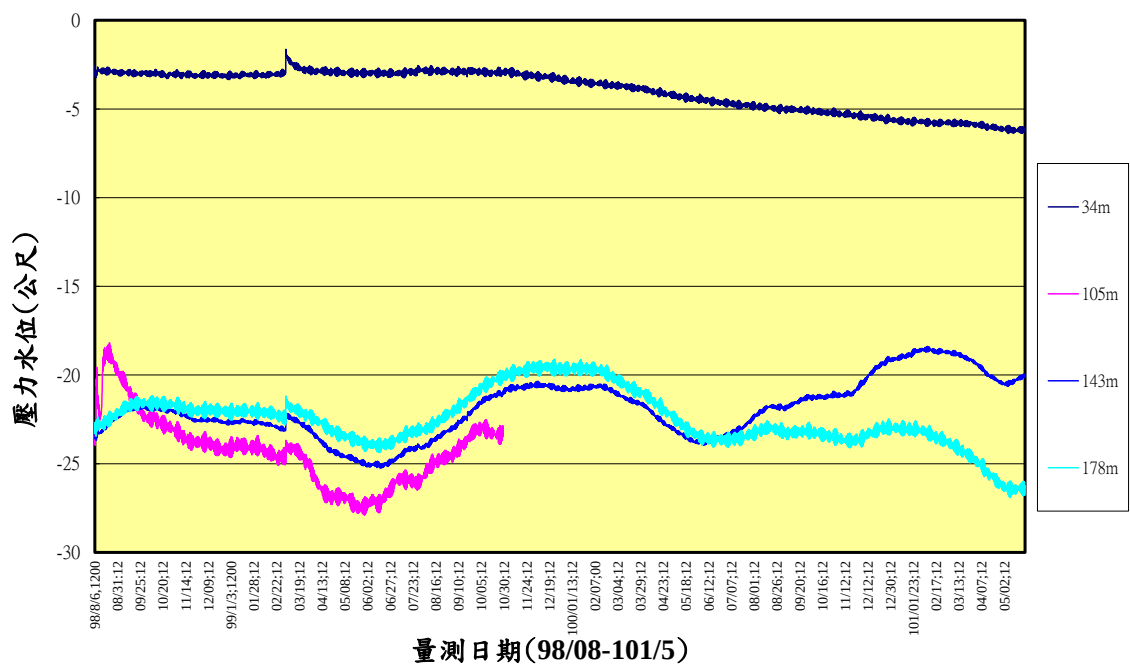


圖 3.7(b) 布袋港分層水位變化圖(自記式)(98/8/06-101/5/25)

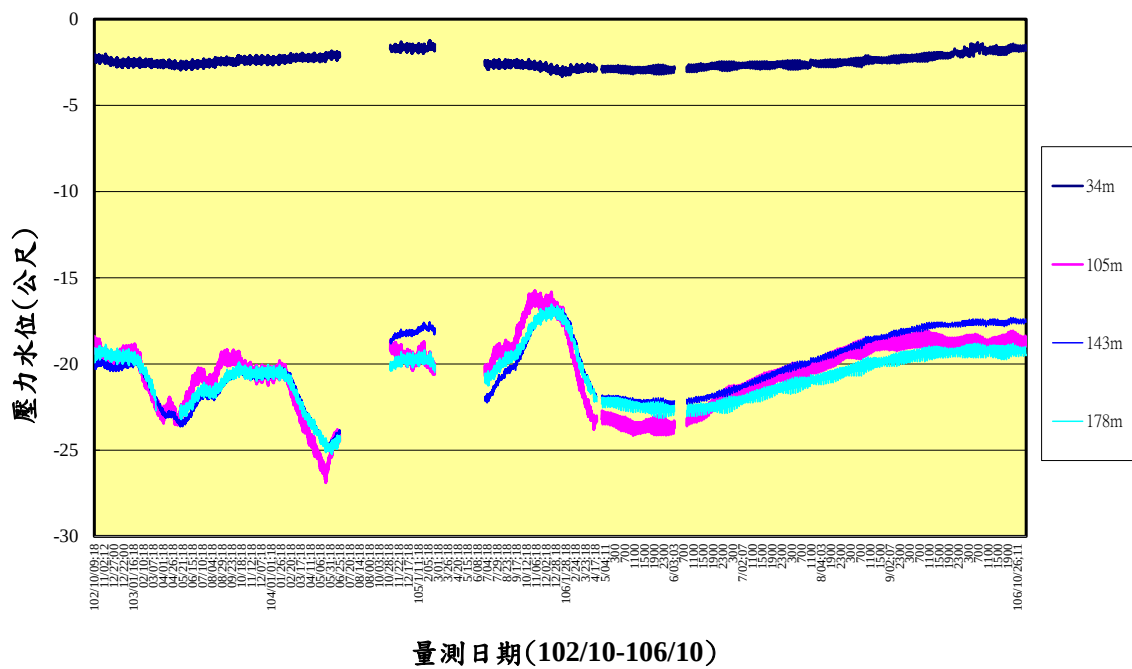


圖 3.7(c) 布袋港分層水位變化圖(自記式)(102/10/8-106/10/30)

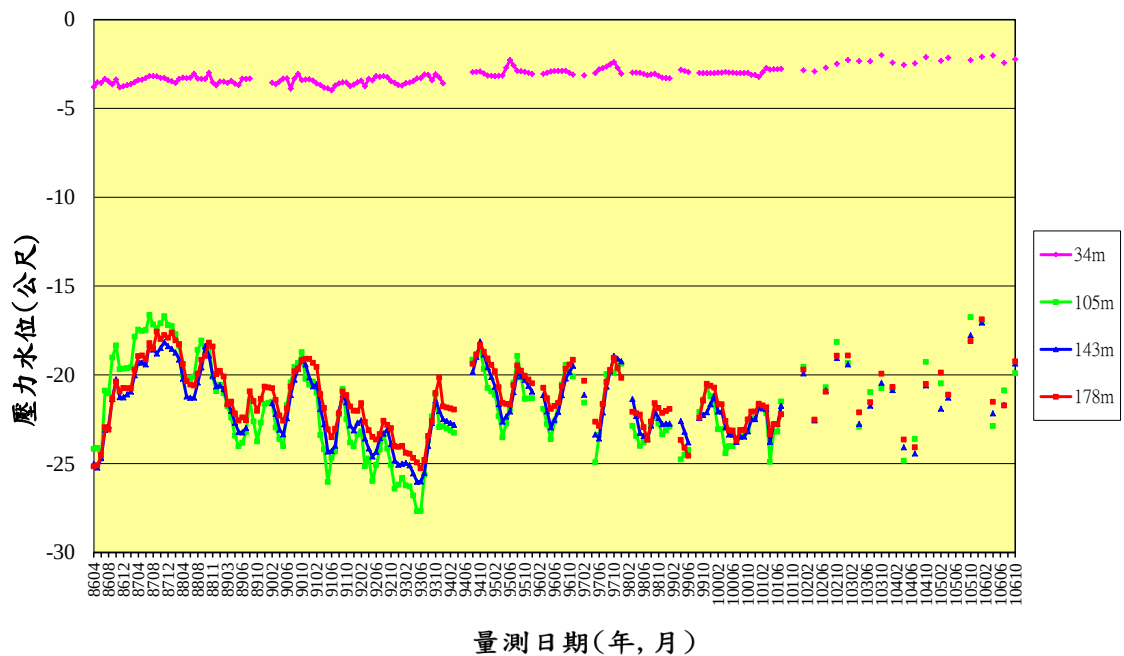


圖 3.8 布袋港 200m 分層水位變化圖(手動量測)

2. 300 m 監測站

在 300m 監測站內設置監測井 3 孔，包括地層下陷監測井 1 孔，地下水位監測井 2 孔。

(1)地層下陷監測井與監測資料

地層下陷監測井為深度 300m 的電磁式分層地層下陷監測井，共設置 30 個沈陷磁環，分別位在深度 3、7、11、21、31、35、51、66、83、94、102、109、112、123、134、142、156、163、178、190、202、212、218、231、241、261、278、285、294、300m 之位置。

該監測井自民國 89 年 10 月開始量測。圖 3.9 為分層累積下陷圖，自 89 年 10 月至 107 年 10 月止，18 年期間之累積總沉陷量約 92 公分。各分層沉陷量大約可區分為 7~66m、66~102m、102~190m、190~300m 等 4 個層次來分析，66~102m 之累積沉陷量 25.8 公分，約占總沈沉陷量之 29%。其中以 102~190m 之沉陷量為 40.3 公分所占比例最大，約占總沉陷量之 43.8%，190~300m 之沉陷量較少為 9.5 公分，約佔總沉陷量之 10.3%。

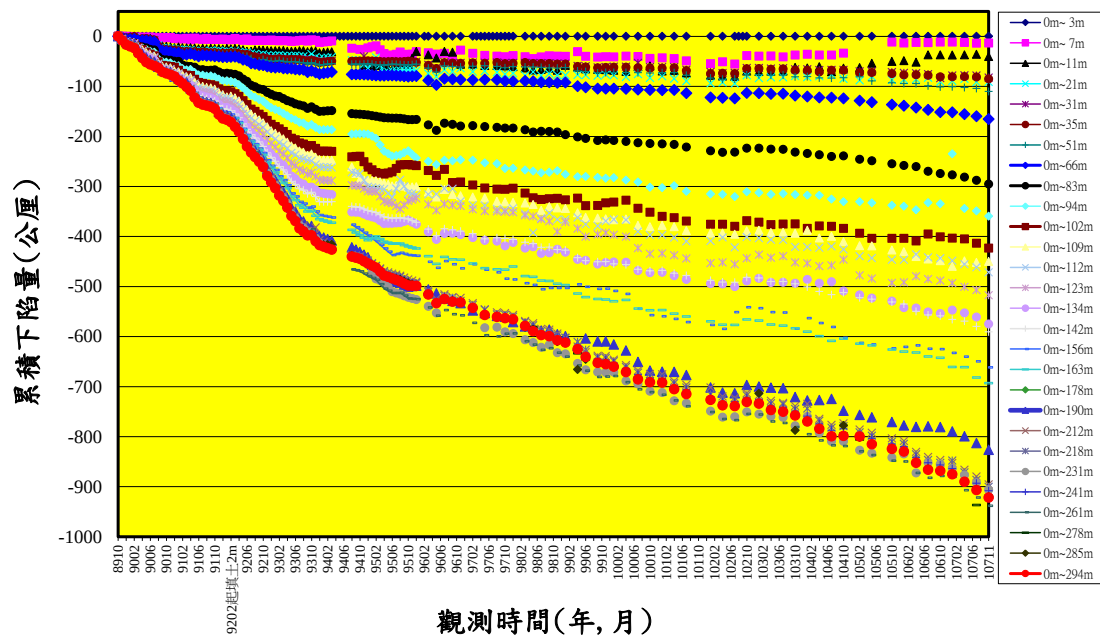


圖 3.9 布袋港 300m 監測站之分層累積下陷圖

(2)地下水位監測井與監測資料

在 300m 監測站處，設置 2 孔深層水壓監測井，分別為 100 公尺及 300 公尺，每孔埋設 4 支水壓計，總共 8 支，其深度分別為 35m、50m、85m、103m、150m、200m、250m、303m。自 90 年 9 月起進行定期量測，如圖 3.10 顯示。資料顯示：35 及 50m 之水壓計水位介於-2.4~-3.5m 之間，屬淺層水位，85 及 103m 為較深層，其水壓計之水位介於-15~-24m 之間，且屬同一含水層，其中以 91 年 5 月及 93 年 6 月之水位分別降至-22m 及-24m 較明顯變化，150m 及 200m 之水壓計水位介於-19.2~-23.3m 之間，亦屬同一含水層，250m 水壓計之水位介於-21~27m 之間，而 303m 之水位又屬另一含水層，其水壓計水位介於-22~-25m 之間變化。

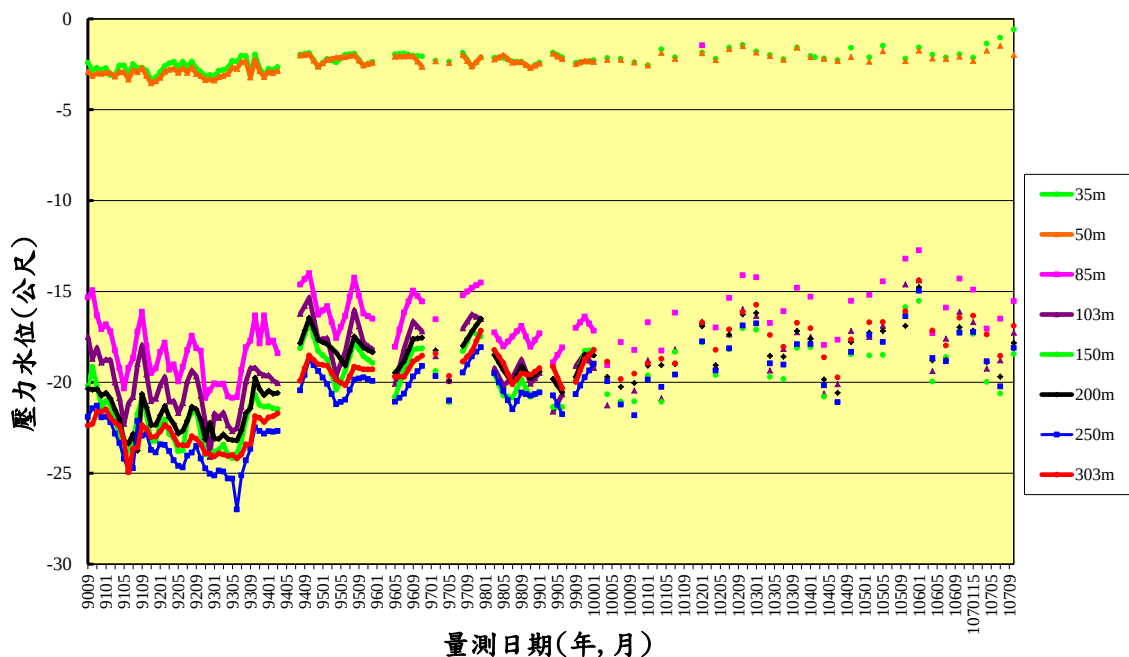
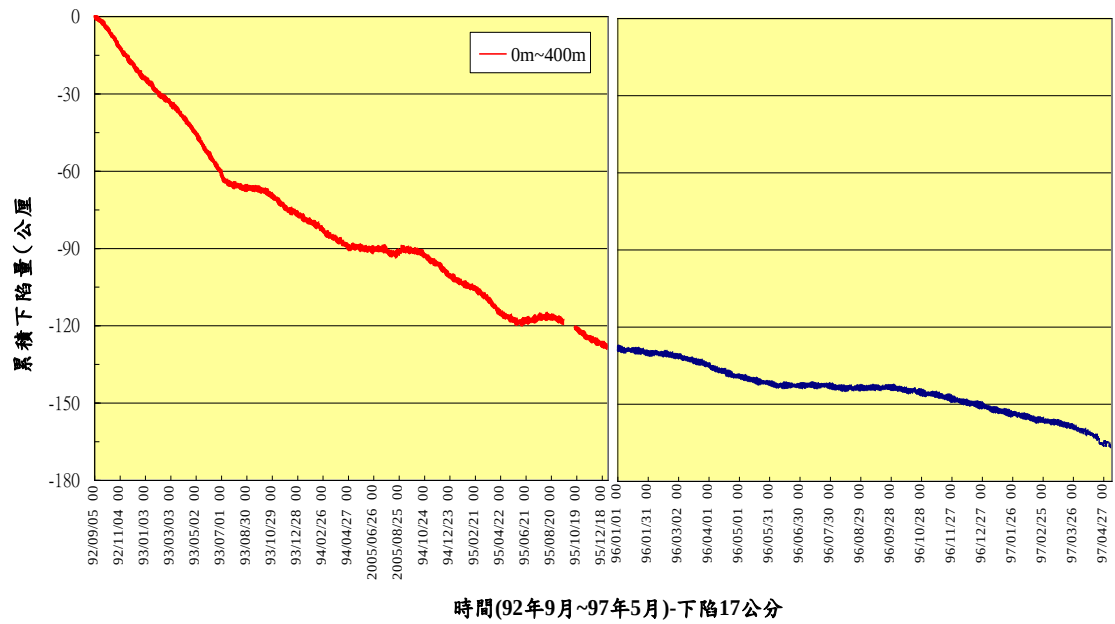


圖 3.10 布袋港 300m 分層水位變化圖(手動量測)

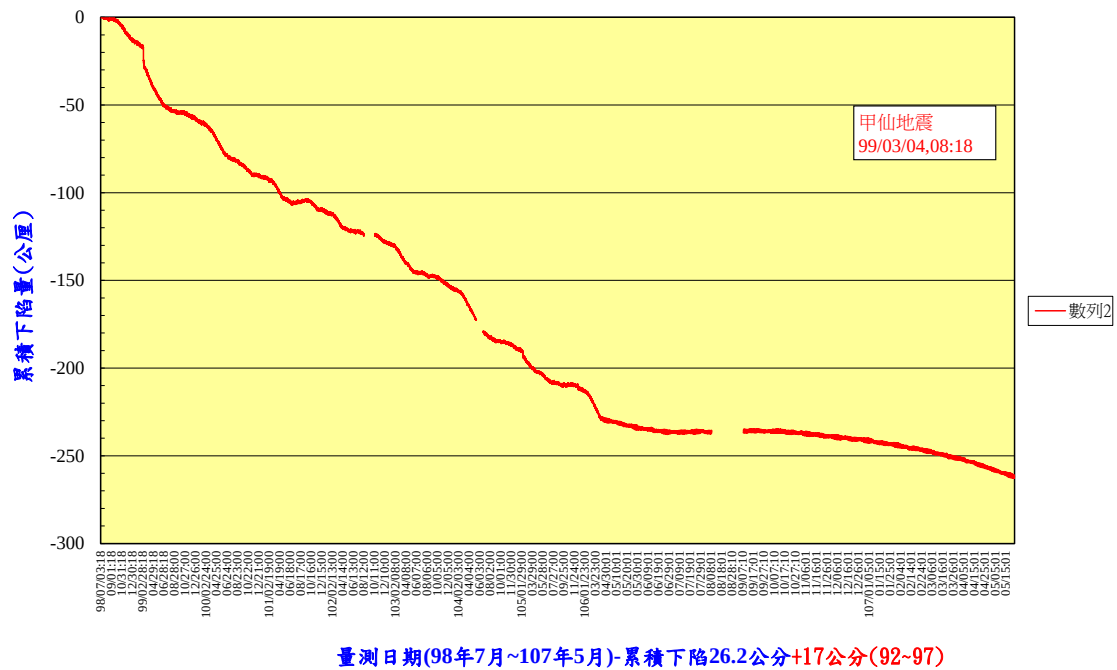
3.400 m 監測站

400m 監測站，自民國 92 年設置於布袋商港區的西北角隅，為一個長期之地層下陷自動監測站，設定時間為每 6 小時自動記錄一筆，除在民國 97 年 5 月至 98 年 7 月期間因儀器故障而缺少資料外，在民國 92 年 9 月至 97 年 4 月期間的累積下陷量約 17 公分，在民國

98 年 7 月至 107 年 5 月之累積下陷量約 23 公分，合計總累積下陷量約為 43.2 公分，如圖 3.11(a)(b)所示。



(a) 92/09/04~97/05/30



(b) 92/09/04~97/05/30

圖 3.11 布袋港 400m 監測站之累積下陷量圖

3.3 安平港監測站

安平港監測站設置在安平港區內規劃之觀光遊憩商業區(II)後線綠地處，如圖 3.12 所示。監測站內設置監測井 2 孔，包括地層下陷監測井 1 孔，地下水位監測井 1 孔。



圖 3.12 安平港監測站位置圖

1. 地層下陷監測井與監測資料

設置的地層下陷監測井為深度 250 m 的電磁場式分層地層下陷監測井，共設置 22 個沈陷計感應磁環，分別位在深度 0.6、4、10、20、30、40、52、55、79、94、110、133、149、174、180、200、210、220、230、239、248、249 m 之位置。該監測井自民國 88 年 7 月開始量測，至 94 年 3 月因測站儀器故障而量測資料中斷。

在 88 年 7 月至 94 年 3 月的量測期間(5 年 8 個月)，地表下 0~200 m 間之沉陷總量為 7.3 公分，而其中 0~56 m 間之沉陷量為 6.7 公分，佔總沉陷量之 91.78%，由資料顯示，該地區之沉陷屬於淺層沉陷。如圖 3.13 所示。

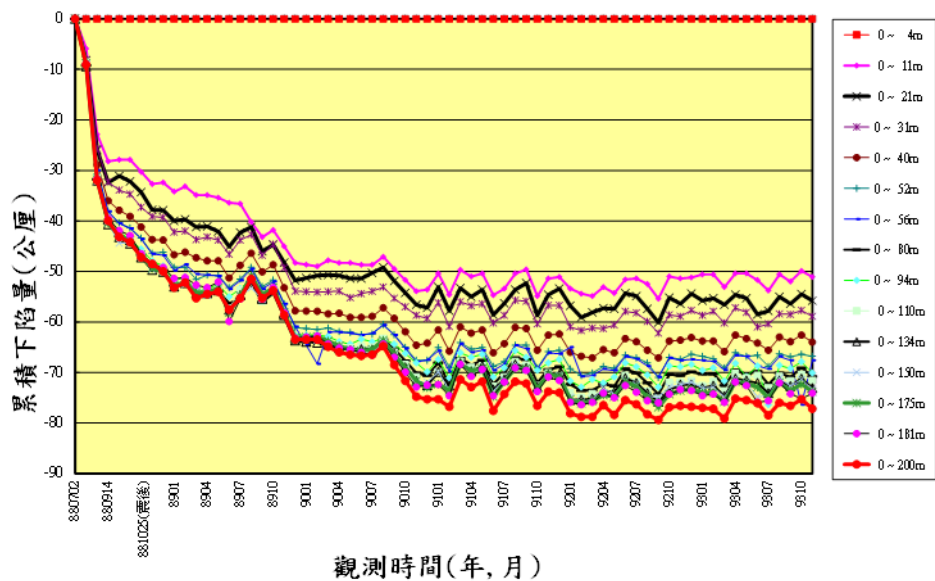


圖 3.13 安平港分層累積下陷量圖(250m)

2. 地下水位監測井與監測資料

設置的地下水位監測井為 200 公尺深之分層水壓觀測井，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 40 m、75 m、105m、145m、182 m。自民國 88 年 7 月開始量測，每月量測一次，而後自 99 年 1 月起，每 3 個月量測一次，其結果如圖 3.14 所示。

分析資料之結果顯示：各地層之地下水位，深度 40 m 及 75 m 為第 1 含水層之水位，深度 105 m 為第 2 含水層，深度 145m 為第 3 含水層，深度 182 m 為第 4 含水層，由水位變化顯示，第 1 含水層之深度 40 m 及 75 m 含水層之水位變化較大，超抽地下水現象明顯，第 2 含水層之深度 105m 含水層之水位變化不大，第 3、4 層之深度 145m 及深度 182 m 之水位變化較大，唯水位不降反升，顯示此層水位有回補現象。整體來說，安平港附近地區近年來(民國 96~105 年)應沒有受到超抽地下水影響，故地下水位呈現上下變動現象。

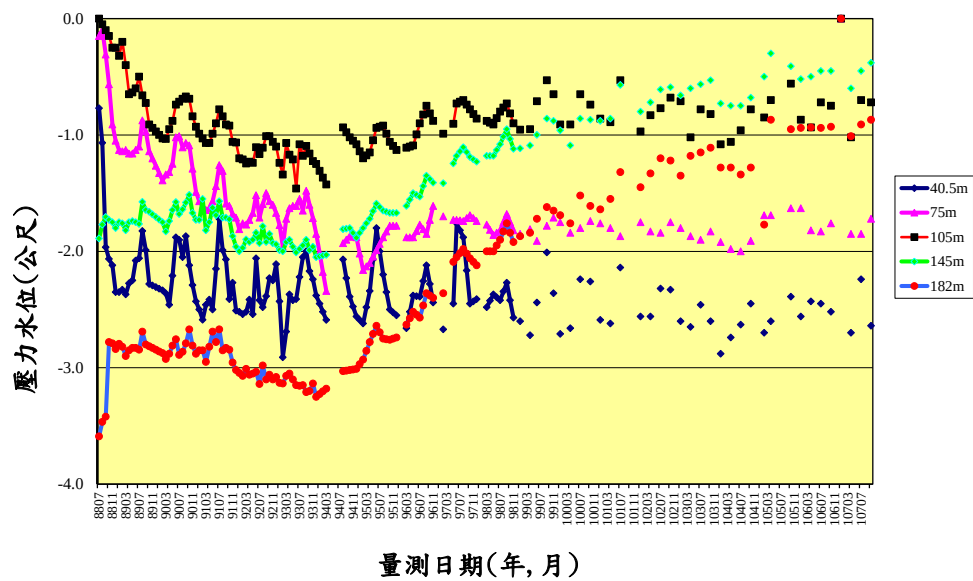


圖 3.14 安平港分層水位變化圖(手動量測)

3.4 大鵬灣監測站

大鵬灣監測站設置在大鵬灣風景區西南角位置，如圖 3.15 所示。監測站內設置監測井 2 孔，包括地層下陷監測井 1 孔，地下水位監測井 1 孔。

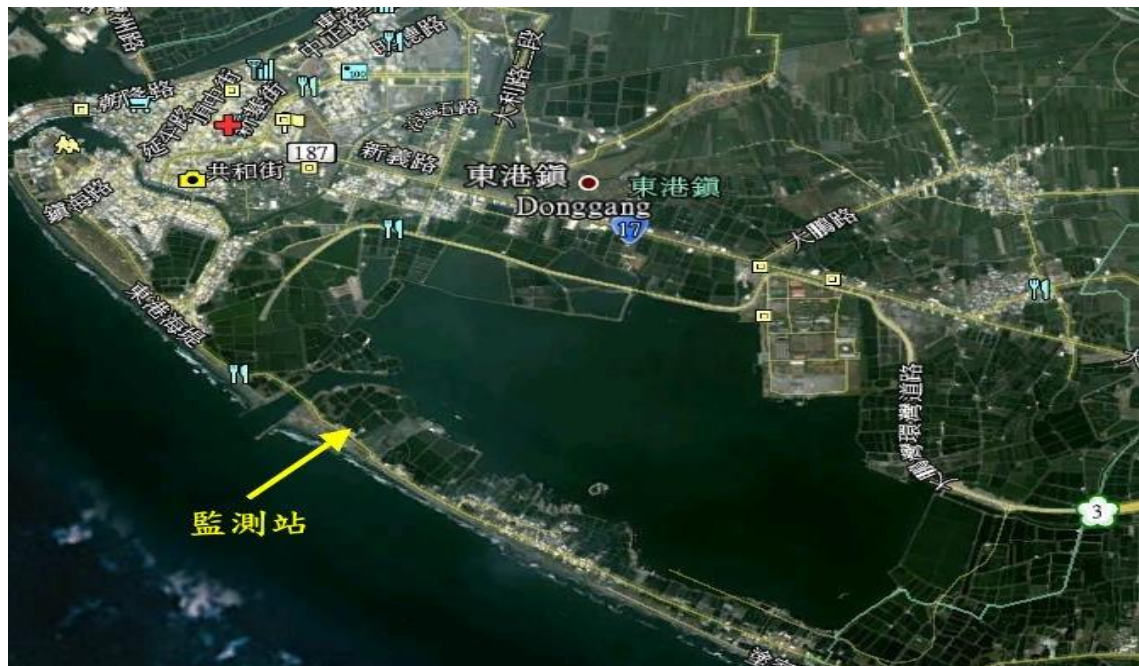


圖 3.15 大鵬灣監測站位置圖

1.地層下陷監測井與監測資料

地層下陷監測井為深度 200m 的電磁式分層地層下陷監測井，共設置 22 個沈陷感應磁環，分別位在深度 4、26、31、51、55、62、90、101、103、108、115、119、124、129、138、146、155、161、173、177、188、189 m 之位置。

該監測井自民國 87 年 3 月開始量測，定期以無線電波監測儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，以分析不同深度地層之壓縮量，資料值由鈰鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

至民國 107 年 7 月 (共計 20 年 4 個月期間) 止，累積總沉陷量約為 14.5 公分，其中地表下 0~51.3 m 深之沉陷量約 10.4 公分，佔總沉陷量的 71.7%，顯示大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷。圖 3.16 顯示不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖。

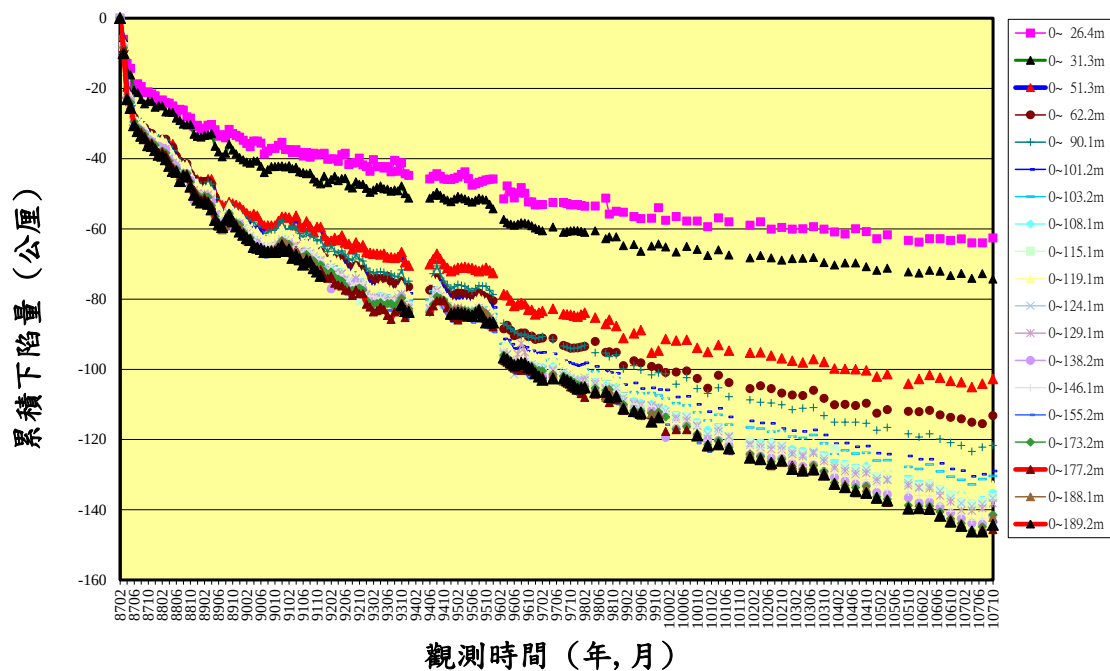


圖 3.16 大鵬灣分層累積下陷量圖(200m)

2.地下水位監測井與監測資料

地下水位監測井為 202 m 深之分層水壓觀測井，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 35 m、58 m、105 m、142 m、202 m。自民國 87 年 3 月開始量測，早期量測水位係採用手動與自動 2 方法並行之

方式，後來則僅採用手動量測水位，每 3 個月量測 1 次。至民國 107 年 6 月止的量測資料如圖 3.17 所示。

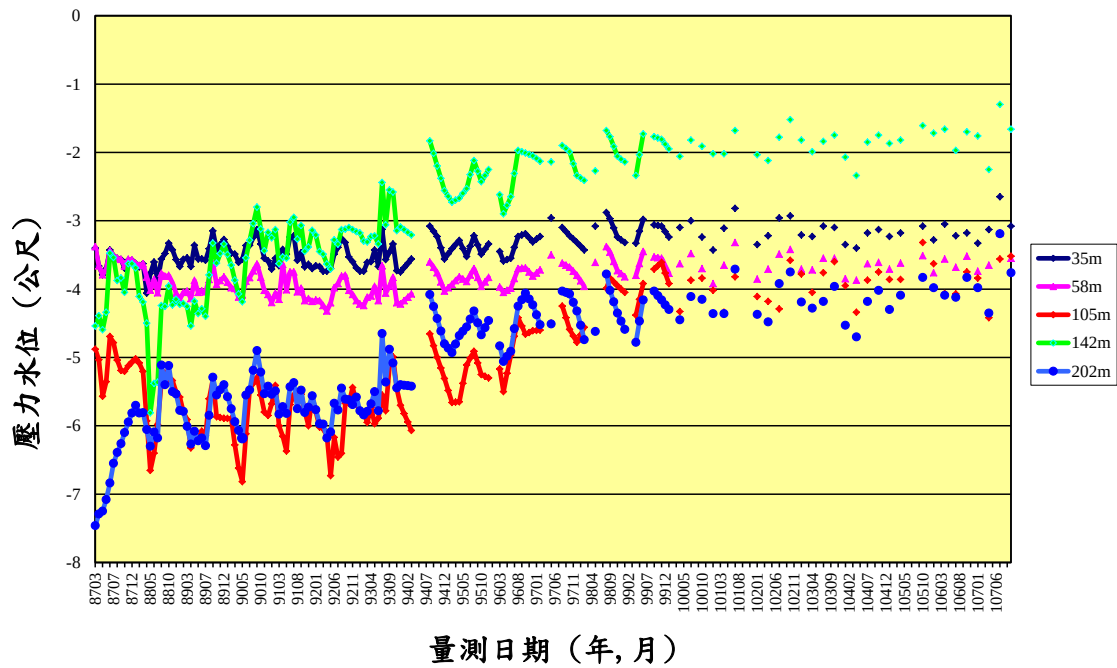


圖 3.17 大鵬灣分層水位變化圖

第四章 地層下陷與地下水位之關聯模式建立

在本章建立地層下陷與地下水位之關聯模式。依據本所於各地區監測站蒐集到的原始測量數值，經分析後計算出各監測站的地層下陷量與地下水位值。地層下陷量包括總下陷量與分層下陷量，地下水位值包括各層地下水位值。進而嘗試運用統計軟體，找出各地區各層地層下陷量與相對應之地下水位值的關聯模式。以下，在 4.1 節先說明構建模式採用迴歸分法的理由與方法論，在 4.2 節嘗試選出適當的反應變數 Y 與解釋變數 X ，建立地層下陷與地下水位迴歸模式，在 4.3 節分別就臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣四地測站資料建立各自的迴歸模式。

4.1 模式構建方法

由前面第二、三章之探討與說明可知，超抽地下水、地表荷重增加、地震力作用、土壤壓密未完成等等因素均是地層下陷的影響因素，但超抽地下水的行為是造成地層下陷的主要原因，因此，本所於臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等四地區設置監測站，長期蒐集地層下陷與地下水位之資料。

過去本所以土壤力學的 Biot 耦合壓密理論、Terzaghi 單向壓密理論為基礎，發展地層下陷模擬預測模式，如：Lay and Hsieh (1995)、賴聖耀等人(1998)、陳志芳與賴聖耀(2002)等。在構建模式中，需測求土樣的各項參數，包括初始孔隙比、壓縮係數、壓縮指數、回彈係數、回彈指數...等等，需投入大量的人力與經費做詳細精密的調查與分析工作。

在目前本所人力與經費有限條件下，本研究嘗試採用迴歸分析法，無需調查測求上述相關參數，僅依據土壤力學理論與本所既有的監測資料，發展建立一個地層下陷與地下水位的迴歸模式。

所謂迴歸(Regression)係指研究多個變數間的關係，發展建立一個統計模式，以此模式可以由一個或數個解釋變數 X 的值，來說明或預

測某一反應變數 Y 的值。所謂迴歸分析(Regression Analysis)係指發展建立一個統計模式的過程，也就是說，依據統計數據配適一條合適的直線或曲線的過程。

此一過程主要包括以下數個步驟：

1. 確定解釋變數 X 與反應變數 Y；
2. 配適迴歸模式，估計模式參數；
3. 檢定模式顯著性與配適度；
4. 檢定模式妥當性；
5. 做進一步分析應用。

4.2 地層下陷與地下水位迴歸模式

就本研究而言，在此嘗試依據本所實際監測資料(統計數據)，配適一條合適的直線或曲線，建立地層下陷與地下水位間的迴歸模式(統計模式)。此一模式可以由地下水位的相關數值，來說明地層下陷的相關數值，也就是說，模式中的反應變數 Y 為地層下陷的相關數值，解釋變數 X 中考量到地下水位的影響，將地下水位的相關數值納入考量。

要配適一條合適的直線或曲線模式，必須已知或假設變數與變數間的關係式。在此，先考量實際監測數值特性與土壤力學理論關係，選擇出適當的變數，然後再據以建立迴歸模式。

4.2.1 變數選擇

1. 反應變數 Y 的選擇

關於本所的地層下陷監測資料，量測值為監測井中多個沈陷感應磁環的深度，經計算後可以求得在不同時間點的相對下陷量、總下陷量與各地層深度下陷量。例如：臺中港自民國 88 年 6 月~106 年 7 月，0~181m 的累積總沈陷量為 5.8 公分，其中 0~90 m 深之沈陷量約 4.6 公分，占總沈陷量 80%以上。

由土壤力學基礎理論可知：不同土層的沈陷量與沈陷速率不同。當土壤受壓後，土層中飽和砂土或礫石中的孔隙水，會在很短時間

(數天內)被擠壓排出，產生即時沈陷；土層中的黏土排水速度慢，產生的超額孔隙水壓需很長時間排除，可能長達數年到數十年之久，此一沈陷稱為壓密沈陷；此外，若為較軟弱黏土及有機質土壤，在超額孔隙水壓消散、壓密完成後，隨著時間增加仍會有二次壓縮沈陷發生。總沈陷量是即時沈陷量、壓密沈陷量與二次壓縮沈陷量之合計。

考量到「總累積下陷量」較能反應長時間地下水位變動產生應力對地層下陷之整體影響，因此，在此嘗試選擇以「總累積下陷量」為反應變數 Y ，即 $Y_i =$ 從基期至第 i 時間點的總累積下陷量。

2. 解釋變數 X 的選擇

關於本所的地下水位監測資料，量測值主要為分層水壓觀測井中多個不同深度水壓計所量測到的水位，經計算後可以求得在不同時間點各深度的相對水位上升或下降量。例如：大鵬灣 35m 深水壓計在民國 87 年 3 月 5 日量測的水位為 -3.4m，在 87 年 3 月 18 日量測的水位為 -3.665m，可計算出在此 13 日之間(3 月 5~18 日)水位下降了 26.5cm。

在解釋變數 X 的選擇上，考慮到以下 4 點：

(1) 地層下陷之沈陷量與壓力對數值間較有線性相關

由土壤力學的基礎理論可知：土壤具有壓縮性，若在同一階壓力下，土壤的初期沈陷較快，爾後會逐漸趨於穩定；透過壓密試驗可以找到土壤的壓密曲線、壓縮係數與壓縮指數；進而在單向壓縮假設下求得土壤沈陷量的單向壓縮公式：

$$\Delta H_c = H_0 \frac{C_c}{1+e_0} (\Delta \log \sigma) \quad (\text{式 4.1})$$

式中 ΔH_c 是壓密沈陷量、 H_0 是土層厚度、 C_c 是壓縮指數、 e_0 是初始孔隙比、 σ 是壓力。由式 4.1 可知：壓密沈陷量(ΔH_c)與壓力取對數值後之差異量($\Delta \log \sigma$)兩者間有線性關係。

(2) 以「時間長度」來反應覆土壓力的影響

本所四個監測站均位於臺灣西南沿海地區，地層大多屬於現

代沖積層，土層疏鬆軟弱，壓密尚未完成，故在考慮土層受到的有效應力時應將覆土壓力納入考量。由於覆土壓力所造成的地層下陷量主要隨著時間的增加而增大，因此，在此選擇以時間長度來反應覆土壓力之影響。

(3)以「累計延時總水位下降值」來反應地下水位作用力的影響

理論上，當地下水位下降時，土壤的有效應力增加，會造成地層下陷；當水位上升時，土壤解壓會造成地層略為回脹；當水位再下降時，土壤的有效應力再增加，再造成地層再壓縮而略為下陷。也就是說，實際上地下水位會隨著雨量多寡而上下變化，造成地層反覆處於加壓、回脹、再壓、再回脹...的狀況，真實情況極為複雜。

一般來說，地下水位下降所造成的地層下陷量大，而地下水位上升所造成的回脹量則相對微量。本文參考採用本所早期研究(Lay and Hsieh, 1995)，考慮水位下降時土壤有效應力增加所產生之加壓變形，暫不考量水位上升時所產生的微量回脹量，選擇以地下水位下降值來反應地下水位作用力的影響。

並考慮到隨著受壓時間的增加，總地層下陷量亦會隨之增加，在分析時宜將受壓時間納入考量。由實際量測資料可知，每次量測的時間間隔不同，在早期是每月量測一次，近期是每3個月量測一次，且其間受相關因素影響而缺記錄。假設水位下降產生的作用力，是從本次量測日持續到下一次量測日，則為考量受壓時間長短的影響，本文將選擇以「累計延時總水位下降值」來反應地下水位作用力的影響。

(4)以「指標變數」來反應重大地震作用力的影響

依據中央氣象局地震測報中心網頁資料，近年來臺灣發生的大地震主要有1999年9月21日集集大地震、1999年10月22日嘉義地震、2002年3月31日花蓮外海地震、2006年4月1日臺東地震、2006年12月26日恆春地震、2016年2月6日美濃地震。此6次大地震在本所監測站所在地的震度整理如表4-1所示，

資料顯示其中在 1999 年 9 月 21 日集集大地震的臺中港監測站，以及 1999 年 10 月 22 日嘉義地震的布袋港監測站的地震達到芮氏規模 5 級。

基於地震作用力會造成土壤壓縮，在此嘗試將監測站所在地發生芮氏 5 級以上的大地震之影響納入考量，在模式中將以指標變數來反應此一重大地震作用力。

表 4-1 重大地震在本所下陷監測站的震度

編號	發生日期	地震名稱	臺中港 監測站	布袋港 監測站	安平港 監測站	大鵬灣 監測站
1	1999.09.21	集集大地震	5	4	4	4
2	1999.10.22	嘉義地震	4	5	4	3
3	2002.03.31	花蓮外海地震	3	3	2	2
4	2006.04.01	臺東地震	2	2-3	2-3	3-4
5	2006.12.26	恆春地震	2-3	3-4	3-4	3-4
6	2016.02.06	美濃地震	3	4	4	4

資料來源：本研究整理自中央氣象局網站 (<https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/page/disaster/3>)，資料引用時間：2019.11.17)。

4.2.2 模式建立

透過以上的變數選擇分析後，接下來嘗試構建地層下陷與覆土壓力、地下水位作用力、地震作用力的關係式。假設在真實情況下，反應變數 Y 與解釋變數 X 間的關係是直線關係模式，兩者母體間的關係式為：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2) \quad (\text{式 } 4.2)$$

其中 Y 是總累積下陷量；

X_1 是覆土壓力影響因子，以總累計時間長度對數值來反應；

X_2 是地下水位作用力影響因子，以累計延時總水位下降對數值來反應；

X_3 是重大地震作用力影響因子，將監測站所在地發生規模 5 級以上的地震，以指標變數來反應；

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 為母體參數；

ε 是反應變數 Y 的隨機誤差，期望值為 0，變異數為 σ^2 ($E(\varepsilon) = 0, V(\varepsilon) = \sigma^2$)，且各隨機誤差彼此獨立無相關，即 $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ 。

假設樣本觀測值（本所監測資料）是從母體隨機抽樣得到，若此假設成立，則理論上此一樣本可反應並推估母體的實際情況，令樣本的多元直線迴歸模式為

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + e \quad (\text{式 } 4.3)$$

其中 Y 是總累積下陷量；

X_1 是覆土壓力影響因子，以總累計時間對數值來反應；

X_2 是地下水位作用力影響因子，以累計延時總水位下降對數值來反應；

X_3 是重大地震作用力影響因子，將監測站所在地發生規模 5 級以上的地震，以指標變數來反應；

b_0, b_1, b_2, b_3 為樣本模式迴歸係數，是母體參數 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的估計值；

e 是殘差。

4.3 各地測站的迴歸模式

在本節運用統計軟體 SPSS 進行迴歸分析，就臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣四地測站資料，以最小平方法估計模式係數，分別建立各自的多元線性迴歸模式。

4.3.1 臺中港迴歸模式

1. 資料說明

臺中港暨有資料從民國 88 年 6 月至 108 年 1 月，在刪除資料不全或無法採用的數據後，以民國 88 年 6 月 22 日的觀測體為基期，採用的樣本數共計 117 筆。

2. 確定變數

- (1) 反應變數 Y_i ：測站的地層下陷量，計算從基期至第 i 時間點在地層深度 0~182 公尺的總累積下陷量，數據從 1.5 至 -60(公釐)。
- (2) 解釋變數 X_{1i} ：測站的覆土壓力影響因子，以從基期至第 i 時間點的總累計時間取對數值來反應，數據從 2.99 至 8.87 (日)。
- (3) 解釋變數 X_{2i} ：測站的地下水位影響因子，以從基期至第 i 時間點的各水位下降量總和取對數值來反應，數據從 0 至 13.82 (延日公釐)。
- (4) 解釋變數 X_{3i} ：測站的重大地震影響因子，考慮在民國 88 年 9 月 21 日發生集集大地震，當地震度達到 5 級，故令 X_{3i} 為指標變數：

$$X_{3i} = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 時間點在集集大地震前;} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 時間點在集集大地震後。} \end{cases} \quad (\text{式 4.4})$$

3. 配適模式

運用統計軟體 SPSS 進行迴歸分析，將 X_1 、 X_2 、 X_3 均放入模式中，得到臺中港的迴歸模式如下：

$$Y = 21.978 - 5.713X_1 - 0.54X_2 - 19.332X_3, R^2_{\text{adj}} = 0.916, F = 424.9 \quad (\text{式 4.5})$$

4.3.2 布袋港迴歸模式

1. 資料說明

布袋港暨有資料從民國 86 年 4 月至 108 年 1 月，在刪除資料不全或無法採用的數據後，以民國 86 年 4 月 15 日的觀測體為基期，採用的樣本數共計 147 筆。

布袋港共 200 公尺、300 公尺與 400 公尺等 3 個測站，其中 400 公尺測站為地層下陷自動監測站，無分層水位變化資料，不列為分析對象，而在 200 公尺與 300 公尺 2 測站中，200 公尺測站有鑿井地層柱狀圖，較有助於進行相關分析，因此本研究選擇以 200 公尺測站的觀測體為分析標的。

2. 確定變數

- (1) 反應變數 Y_i ：測站的地層下陷量，計算從基期至第 i 時間點在地層深度 0~200 公尺的總累積下陷量，數據從 -10.2 至 -671.9 (公釐)。
- (2) 解釋變數 X_{1i} ：測站的覆土壓力影響因子，以從基期至第 i 時間點的總累計時間取對數值來反應，數據從 3.78 至 8.98 (日)。
- (3) 解釋變數 X_{2i} ：測站的地下水位影響因子，以從基期至第 i 時間點的各水位下降量總和取對數值來反應，數據從 9.10 至 14.02 (延日公釐)。
- (4) 解釋變數 X_{3i} ：測站的重大地震影響因子，考慮在民國 88 年 10 月 22 日發生嘉義地震，當地震度達到 5 級，故令 X_{3i} 為指標變數：

$$X_{3i} = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 時間點在嘉義地震前;} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 時間點在嘉義地震後。} \end{cases} \quad (\text{式 4.6})$$

3. 配適模式

運用統計軟體 SPSS 進行迴歸分析，將 X_1 、 X_2 、 X_3 均放入模式中，得到布袋港的迴歸模式如下：

$$Y = 1264.474 - 101.955X_1 - 69.949X_2 + 52.624X_3,$$

$$R^2_{adj} = 0.931, F = 657.667 \quad (\text{式 4.7})$$

4.3.3 安平港迴歸模式

1. 資料說明

安平港暨有可採用的資料從民國 88 年 7 月至 94 年 3 月，在刪除資料不全的數據後，以民國 88 年 7 月 13 日的觀測體為基期，採用樣本數共計 66 筆。

2. 確定變數

- (1) 反應變數 Y_i ：測站的地層下陷量，計算從基期至第 i 時間點在地層深度 0~200 公尺的總累積下陷量，數據從 -22 至 -63.5 (公釐)。
- (2) 解釋變數 X_{1i} ：測站的覆土壓力影響因子，以從基期至第 i 時間點的總累計時間取對數值來反應，數據從 3.53 至 7.64 (日)。
- (3) 解釋變數 X_{2i} ：測站的地下水位影響因子，以從基期至第 i 時間點的各水位下降量總和取對數值來反應，數據從 9.38 至 15.83 (延日公釐)。
- (4) 考量在資料觀測期間無重大地震造成當地震度達到 5 級，因此模式中不納入解釋變數 X_{3i} (重大地震影響因子)。

3. 配適模式

運用統計軟體 SPSS 進行迴歸分析，將 X_1 、 X_2 均放入模式中，得到安平港的迴歸模式如下：

$$Y = 3.201 - 16.197X_1 + 3.127X_2, R^2_{adj} = 0.915, F = 349.684 \quad (\text{式 4.8})$$

4.3.4 大鵬灣迴歸模式

1. 資料說明

大鵬灣暨有資料從民國 87 年 3 月至 107 年 10 月，在刪除資料不全與無法採用的數據後，以民國 87 年 3 月 5 日的觀測體為基期，採用樣本數共計 111 筆。

2. 確定變數

- (1)反應變數 Y_i ：測站的地層下陷量，計算從基期至第 i 時間點在地層深度 0~189.2 公尺的總累積下陷量，數據從-10 至-144.3 (公釐)。
- (2)解釋變數 X_{1i} ：測站的覆土壓力影響因子，以從基期至第 i 時間點的總累計時間取對數值來反應，數據從 2.56 至 8.93 (日)。
- (3)解釋變數 X_{2i} ：測站的地下水位影響因子，以從基期至第 i 時間點的各水位下降量總和取對數值來反應，數據從 9.12 至 15.46 (延日公釐)。
- (4)考量在資料觀測期間無重大地震造成當地震度達到 5 級，因此模式中不納入解釋變數 X_{3i} (重大地震影響因子)。

3. 配適模式

運用統計軟體 SPSS 進行迴歸分析，將 X_1 、 X_2 均放入模式中，得到大鵬灣的迴歸模式如下：

$$Y = 148.699 - 62.256X_1 + 36.631X_2, R^2_{adj} = 0.943, F = 914.984 \quad (\text{式 4.9})$$

第五章 模式顯著性、配適度與妥當性檢定

在前一章已運用統計軟體 SPSS 建立各地測站的迴歸模式，本章進一步就各模式進行顯著性、配適度與妥當性檢定，以確認模式妥當與否。在 5.1 節先說明檢定方法，在 5.2 節分別就各地測站迴歸模式進行檢定，在 5.3 節就檢定結果作診斷。

5.1 檢定方法

1. 顯著性檢定

確定解釋變數 X 與反應變數 Y 之間是否有顯著的線性關係，通常透過 F 檢定或 t 檢定來進行。

2. 配適度檢定

確定模式具有說明能力。 R^2 或 R^2_{adj} 表示模式可說明 Y 變異的比例。

3. 妥當性檢定

模式妥當性檢定在檢定迴歸模式的基本假設是否符合。迴歸模式的基本假設有二：一是在母體的實際情況，反應變數 Y 與解釋變數 X 的關係是近似線性關係；二是隨機誤差 ε 的期望值為 0，變異數為 σ^2 ，且各隨機誤差彼此獨立。即

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2) \quad (\text{式 } 5.1)$$

因此，模式妥當性檢定主要檢核以下幾項：

- (1) 迴歸模式中 X 與 Y 的關係是否為線性關係；
- (2) 殘差項是否具有相同的變異數；
- (3) 殘差項是否彼此獨立；
- (4) 是否有離群值；
- (5) 殘差不是常態分配；

(6)是否仍有未納入模式中的其他重要影響變數。

其中，第(1)(2)項可透過查核「殘差與配適值 Y 之散佈圖」來看：若圖形呈現非線性狀，可能表示 X 與 Y 的關係是非線性；若圖形呈現外張喇叭狀或大小不一狀，可能表示變異數不相等。第(3)項可透過查核「殘差與配適值 Y 之散佈圖」，若無任何圖形，則表示殘差可能彼此獨立，並可以再做 D-W 檢定。第(4)項是否有離群值，可透過查核「殘差與配適值 Y 之散佈圖」與「常態機率圖」來看。第(5)項可透過查核「常態機率圖」來看，若圖形近似直線，則殘差是常態分配。第(6)項可透過查核「殘差與各解釋變數 X 之散佈圖」來看。

5.2 各地測站的迴歸模式檢定

5.2.1 臺中港迴歸模式檢定

在前一章已建立臺中港的迴歸模式如下：

$$Y = 21.978 - 5.713X_1 - 0.54X_2 - 19.332X_3, R^2_{adj} = 0.916, F = 424.9 \quad (\text{式 5.1})$$

以下分別進行模式顯著性、配適度與妥當性檢定。

1. 顯著性檢定

查核模式的 F 檢定值：由 $F = 424.9$ ($P = 0.000$)，可知臺中港的累積下陷量 Y 與三個影響變數 X 之間有顯著的線性關係，顯示模式顯著。

查核各迴歸係數的 t 檢定值：由 b_0 的 $t = 5.258$ ($P = 0.000$) 與 b_1 的 $t = -5.653$ ($P = 0.000$)，兩者 t 檢定值達 95% 顯著水準， b_2 的 $t = -0.445$ ($P = 0.657$) 與 b_3 的 $t = -1.583$ ($P = 0.116$)，兩者 t 檢定值未達 95% 顯著水準；顯示 b_0 與 b_1 有 95% 以上的機率不等於零，但 b_2 與 b_3 有 5% 以上的機率為零，則在臺中港迴歸模式中，覆土壓力影響因子 X_1 對地層下陷量 Y 有顯著影響，地下水位作用影響因子 X_2 與重大地震影響因子 X_3 對地層下陷量 Y 的影響不顯著。

2. 配適度檢定

查核模式的 R^2_{adj} 值：由 $R^2_{adj}=0.916$ ，顯示模式配適度極高，臺中港的累積下陷量 Y 變化量之 91.6% 可以被三個影響變數 X 之變化所解釋。

由模式中迴歸係數估計值 $b_1 = -5.713$ 、 $b_2 = -0.54$ 、 $b_3 = -19.332$ ，表示：當覆土壓力影響因子 X_1 增加 1 單位，其他影響變數 X_2 、 X_3 不變時， Y 減少 5.713(地層下陷 5.713mm)；當地下水位作用影響因子 X_2 增加 1 單位，其他影響變數 X_1 、 X_3 不變時， Y 減少 0.54(地層下陷 0.54mm)；當其他影響變數 X_1 、 X_2 不變時，在集集大地震後($X_3=1$) 比起地震前($X_3=0$)，地層下陷 19.332mm。顯示此模式說明三影響變數 X 對於地層下陷量 Y 的影響方向是符合土壤力學基礎理論：地下水位下降、地震力作用、土壤壓密未完成三因素是地層下陷的影響因素。

3. 妥當性檢定

模式的常態機率圖、殘差與 Y 預測值的散佈圖、殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖(X_3 為指標變數，無散佈圖)如圖 5.1~5.4 所示。圖中顯示：

- (1)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.2)上的點分佈情形來看，圖形沒有明顯之非線性狀，推測 X 與 Y 之關係原則符合線性關係。
- (2)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.2)上的點分佈情形來看，圖形呈現外張喇叭狀，推測殘差可能不具有相同的變異數。
- (3)由各殘差散佈圖(圖 5.2~5.4)上的點分佈情形來看，圖形沒有明顯之特定形狀，推測殘差可能彼此獨立。
- (4)由各殘差散佈圖(圖 5.2~5.4)上的點分佈情形來看，圖形顯示有 3 個離群值，推測此係反應集集大地震前後之差異，在本模式已由重大地震影響因子 X_3 來反應，不會對模式參數估計值有嚴重影響。
- (5)由常態機率圖(圖 5.1)上的點分佈情形來看，圖形無嚴重偏離直線，推測模式無嚴重違反常態分配之假設。

(6)由殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖(圖 5.3~5.4)上的點分佈情形來看，圖形沒有明顯之特定形狀，推測模式無未納入的重要影響因素。

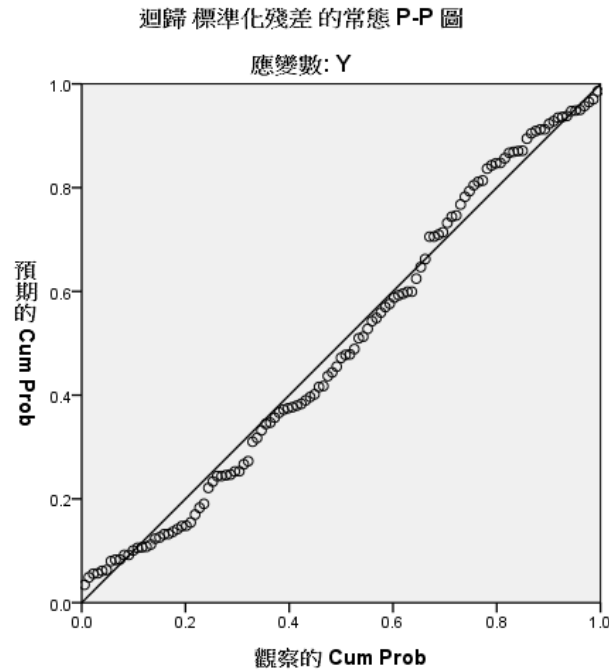


圖 5.1 臺中港迴歸模式的常態機率圖

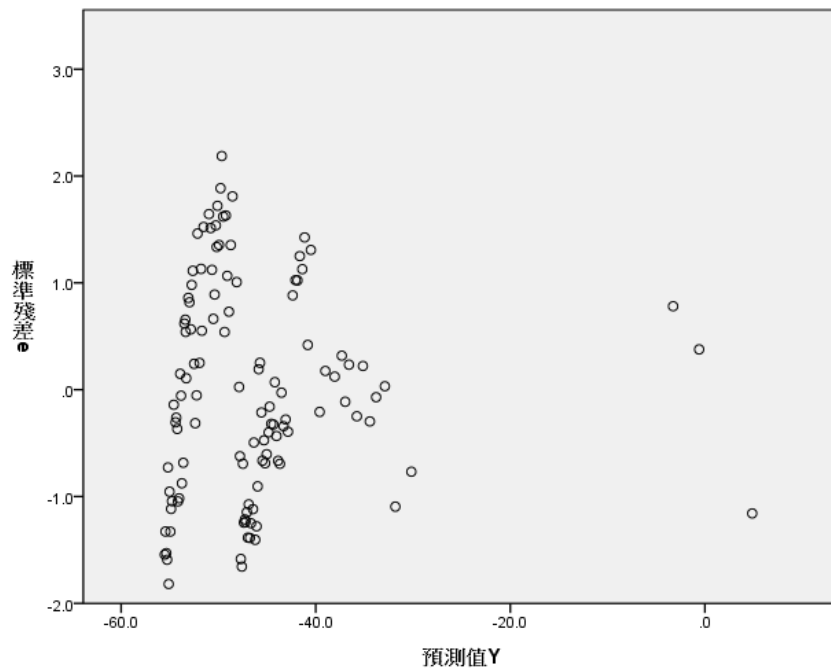


圖 5.2 臺中港迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖

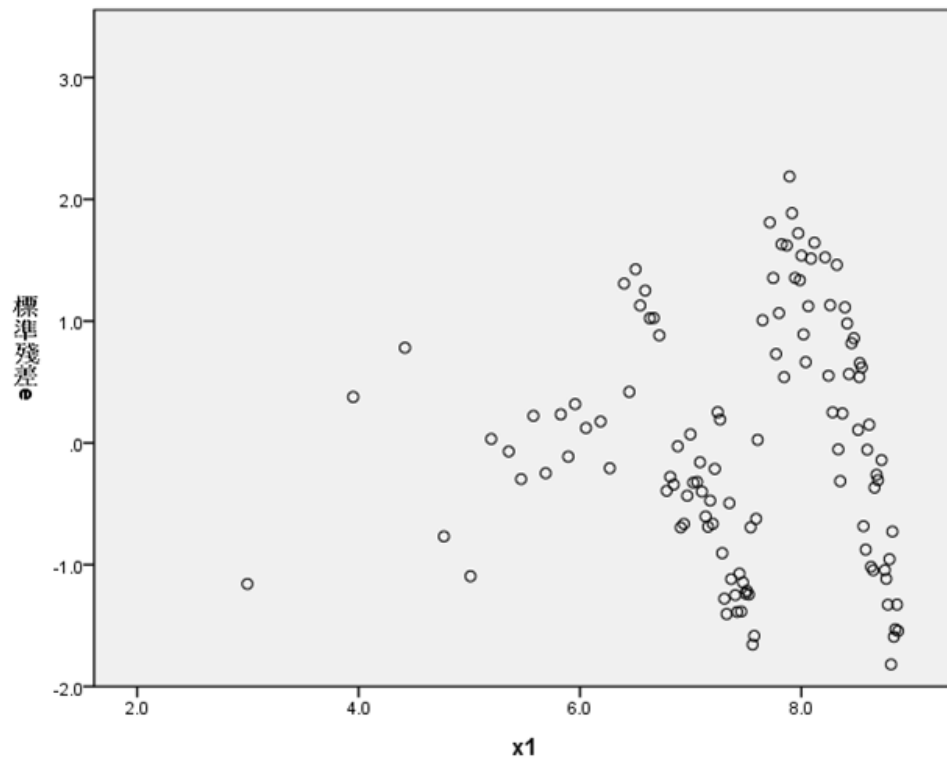


圖 5.3 臺中港迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖

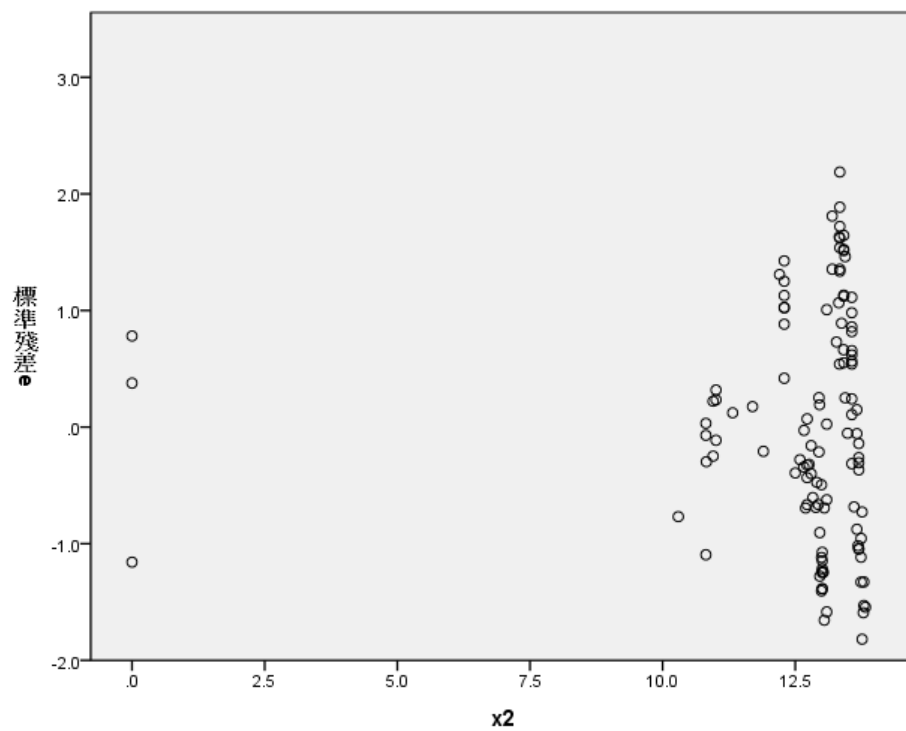


圖 5.4 臺中港迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖

5.2.2 布袋港迴歸模式檢定

在前一章已建立布袋港的迴歸模式如下：

$$Y = 1264.474 - 101.955X_1 - 69.949X_2 + 52.624X_3,$$

$$R^2_{adj} = 0.931, F=657.667 \quad (\text{式 5.2})$$

以下分別進行模式顯著性、配適度與妥當性檢定。

1. 顯著性檢定

查核模式的 F 檢定值：由 $F=657.667$ ($P=0.000$) 顯示模式顯著，布袋港的累積下陷量 Y 與三個影響變數 X 之間有顯著的線性關係。

查核各迴歸係數的 t 檢定值：由 b_0 的 $t=28.327$ ($P=0.000$) 與 b_1 的 $t=-9.120$ ($P=0.000$)， b_2 的 $t=-13.493$ ($P=0.000$) 與 b_3 的 $t=2.680$ ($P=0.008$)，各項 t 檢定值均達 95% 顯著水準，表示各迴歸係數均有 95% 以上的機率不等於零，則在布袋港迴歸模式中，覆土壓力影響因子 X_1 、地下水位作用影響因子 X_2 、重大地震影響因子 X_3 三者均對地層下陷量 Y 有顯著影響。

2. 配適度檢定

查核模式的 R^2_{adj} 值：由 $R^2_{adj}=0.931$ ，表示布袋港的累積下陷量 Y 變化量之 93.1% 可以被三個影響變數 X 之變化所解釋，模式配適度極高。

由模式迴歸係數估計值 $b_1=-101.955$ 、 $b_2=-69.949$ 、 $b_3=+52.624$ ，表示：當覆土壓力影響因子 X_1 增加 1 單位，其他影響變數 X_2 、 X_3 不變時， Y 減少 101.955 (地層下陷 101.955mm)；當地下水位作用影響因子 X_2 增加 1 單位，其他影響變數 X_1 、 X_3 不變時， Y 減少 69.949 (地層下陷 69.949mm)；當其他影響變數 X_1 、 X_2 不變時，在嘉義地震後 ($X_3=1$) 比起地震前 ($X_3=0$)，地層下陷量減少 52.624mm。此一結果顯示此模式在說明土壤壓密未完成、地下水位下降二因素對地層下陷的影響上，是符合土壤力學基礎理論，但在地震力作用 (X_3) 對地層下陷的影響上，是不符合土壤力學基礎理論。

3. 妥當性檢定

模式的常態機率圖、殘差與 Y 預測值的散佈圖、殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖(X_3 為指標變數，無散佈圖)如圖 5.5~5.8 所示。圖中顯示：

- (1)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.6)上的點分佈情形來看，圖形近似曲線形狀，推測 X 與 Y 之關係可能不符合線性關係。
- (2)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.6)上的點分佈情形來看，圖形近似曲線形狀，推測殘差可能不具有相同的變異數。
- (3)由各殘差散佈圖(圖 5.6~5.8)上的點分佈情形來看，圖形有明顯之特定形狀，推測殘差可能非彼此獨立。
- (4)由各殘差散佈圖(圖 5.6~5.8)上的點分佈情形來看，圖形顯示有 2 個離群值，應再就此 2 離群值做進一步查核。
- (5)由常態機率圖(圖 5.5)上的點分佈情形來看，圖形在 0.5~1.0 處略有偏離直線的情況，推測模式可能違反常態分配之假設。
- (6)由殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖(圖 5.7~5.8)上的點分佈情形來看，圖形沒有明顯之特定形狀，不確定模式有無未納入的重要影響因素。

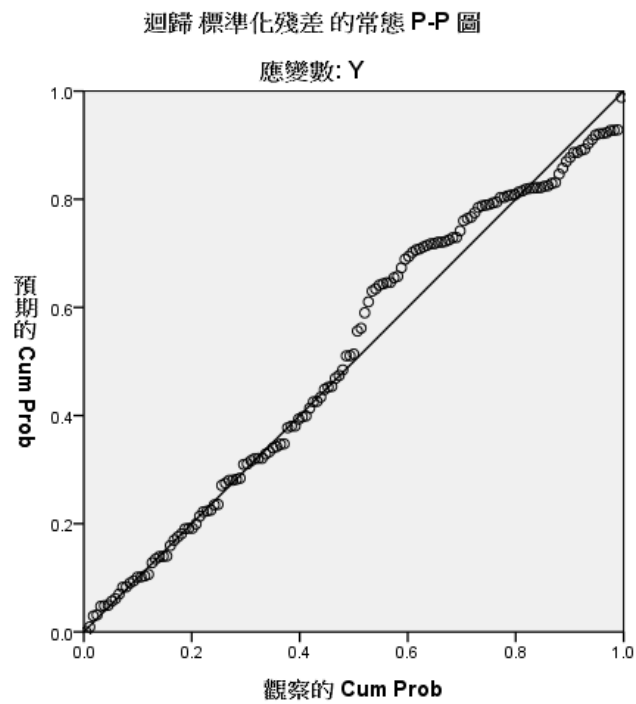


圖 5.5 布袋港迴歸模式的常態機率圖

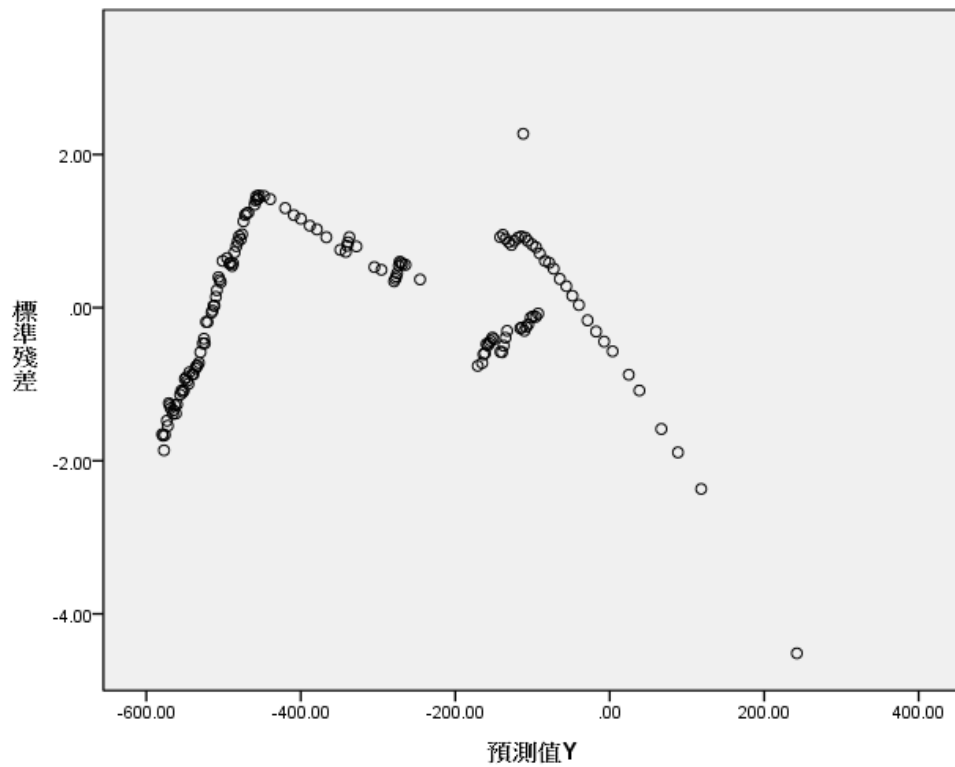


圖 5.6 布袋港迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖

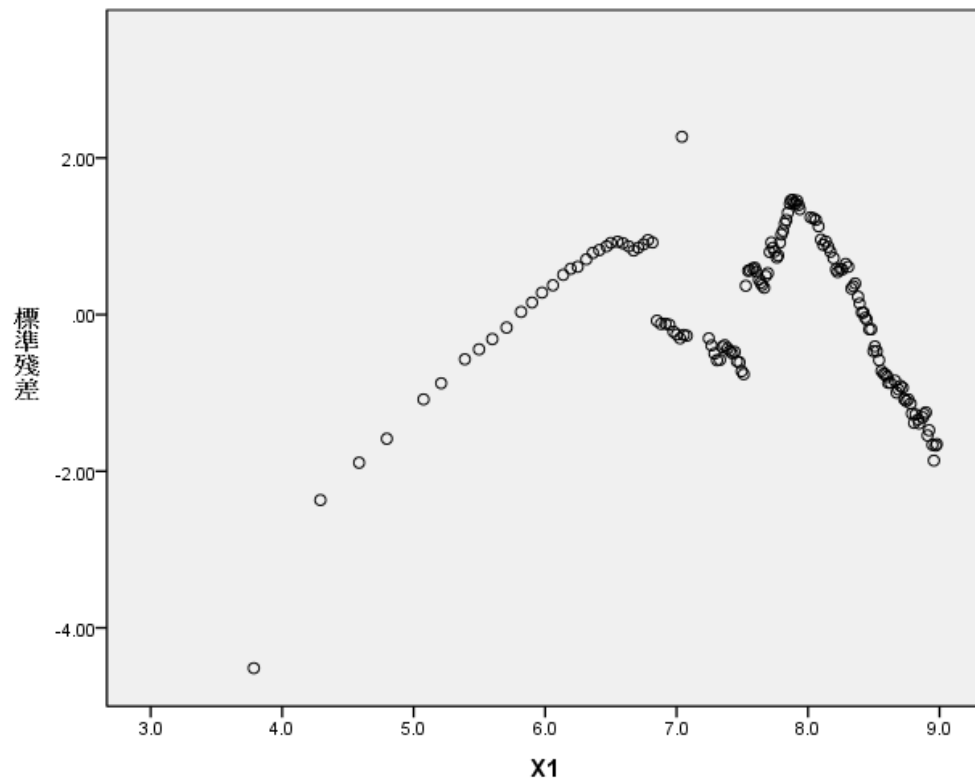


圖 5.7 布袋港迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖

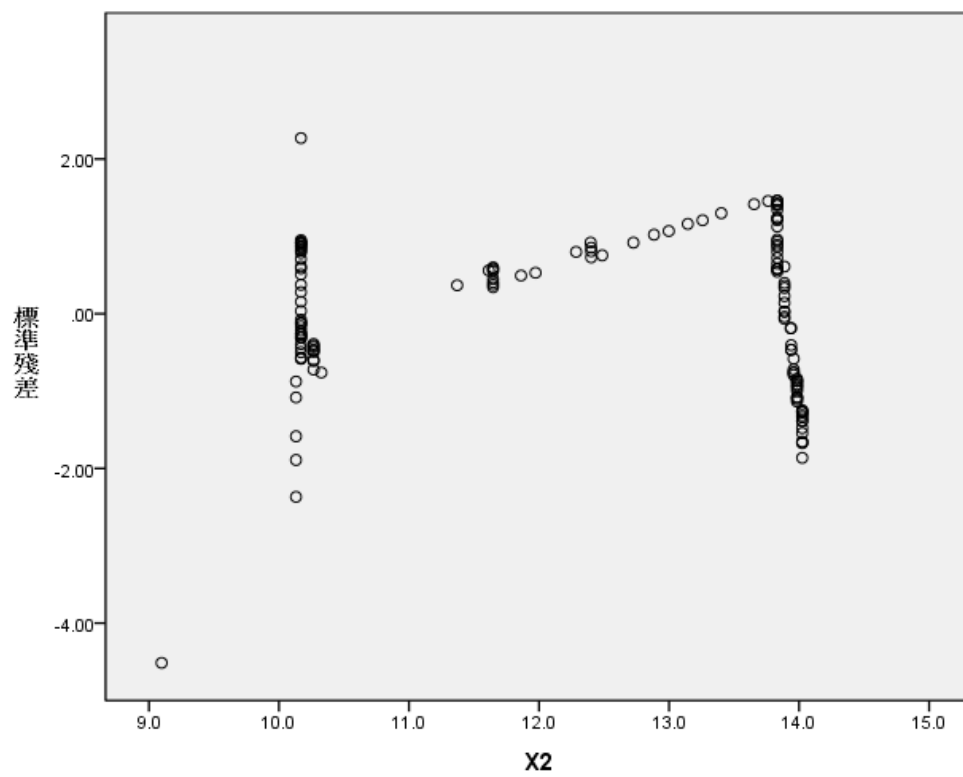


圖 5.8 布袋港迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖

5.2.3 安平港迴歸模式檢定

在前一章已建立安平港的迴歸模式如下：

$$Y = 3.201 - 16.197X_1 + 3.127X_2, R^2_{adj} = 0.915, F = 349.684 \quad (\text{式 } 5.3)$$

以下分別進行模式顯著性、配適度與妥當性檢定。

1. 顯著性檢定

查核模式的 F 檢定值：由 $F=349.684$ ($P=0.000$) 顯示模式顯著，安平港的累積下陷量 Y 與 2 個影響變數 X 之間有顯著的線性關係。

查核各迴歸係數的 t 檢定值：由 b_1 的 $t = -4.069$ ($P=0.000$)，檢定值達 95% 顯著水準， b_0 的 $t = 0.204$ ($P=0.839$) 與 b_2 的 $t = 1.093$ ($P=0.657$)，兩者 t 檢定值未達 95% 顯著水準；表示 b_1 有 95% 以上的機率不等於零，但 b_0 與 b_2 有 5% 以上的機率為零，則在安平港迴歸模式中，模式有可能是無常數項模式，覆土壓力影響因子 X_1 對地層下陷量 Y 有顯著影響，地下水位作用影響因子 X_2 對地層下陷量 Y 的影響不顯著。

2. 配適度檢定

查核模式的 R^2_{adj} 值：由 $R^2_{adj}=0.915$ ，顯示模式配適度極高，安平港的累積下陷量 Y 變化量之 91.5% 可以被 2 個影響變數 X 之變化所解釋。

由模式迴歸係數估計值 $b_1 = -16.197$ 、 $b_2 = +3.127$ ，表示：當覆土壓力影響因子 X_1 增加 1 單位，其他影響變數 X_2 不變時， Y 減少 -16.197 (地層下陷 16.197mm)；當地下水位作用影響因子 X_2 增加 1 單位，其他影響變數 X_1 不變時， Y 增加 3.127 (地層下陷量減少 3.127mm)。此一結果顯示此模式在說明土壤壓密未完成對地層下陷的影響上，是符合土壤力學基礎理論，但在地下水位下降(X_2)對地層下陷的影響上，是不符合土壤力學基礎理論。

3. 妥當性檢定

模式的常態機率圖、殘差與 Y 預測值的散佈圖、殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖如圖 5.9~5.12 所示。圖中顯示：

- (1)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.10)上的點分佈情形來看，圖形沒有明顯之非線性狀，推測 X 與 Y 之關係可能是線性關係。
- (2)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.10)上的點分佈情形來看，圖沒有明顯之特定形狀，推測殘差可能具有相同的變異數。
- (3)由各殘差散佈圖(圖 5.10~5.12)上的點分佈情形來看，圖形無明顯之特定形狀，推測殘差可能彼此獨立。
- (4)由各殘差散佈圖(圖 5.9~5.12)上的點分佈情形來看，圖形無明顯的離群值。
- (5)由常態機率圖(圖 5.9)上的點分佈情形來看，圖形在 0.5~1.0 處略有偏離直線的情況，推測模式可能略有違反常態分配之假設。
- (6)由殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖(圖 5.11~5.12)上的點分佈情形來看，圖形沒有明顯之特定形狀，推測模式無未納入的重要影響因素。

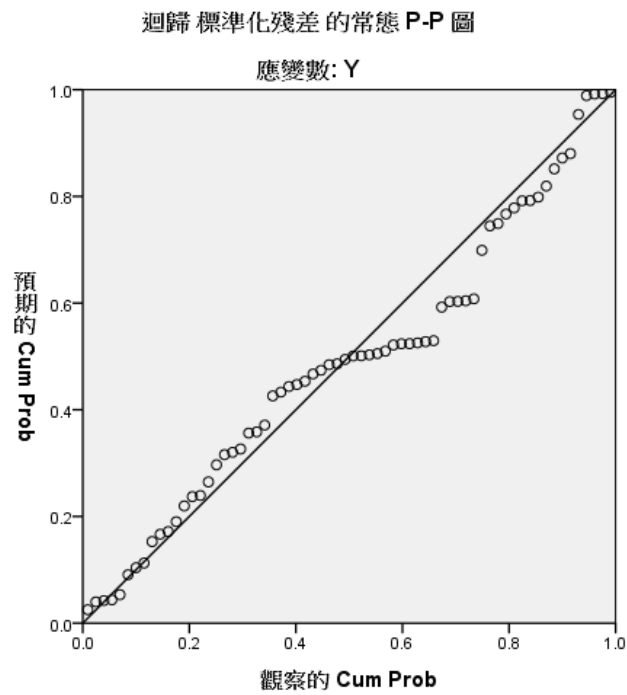


圖 5.9 安平港迴歸模式的常態機率圖

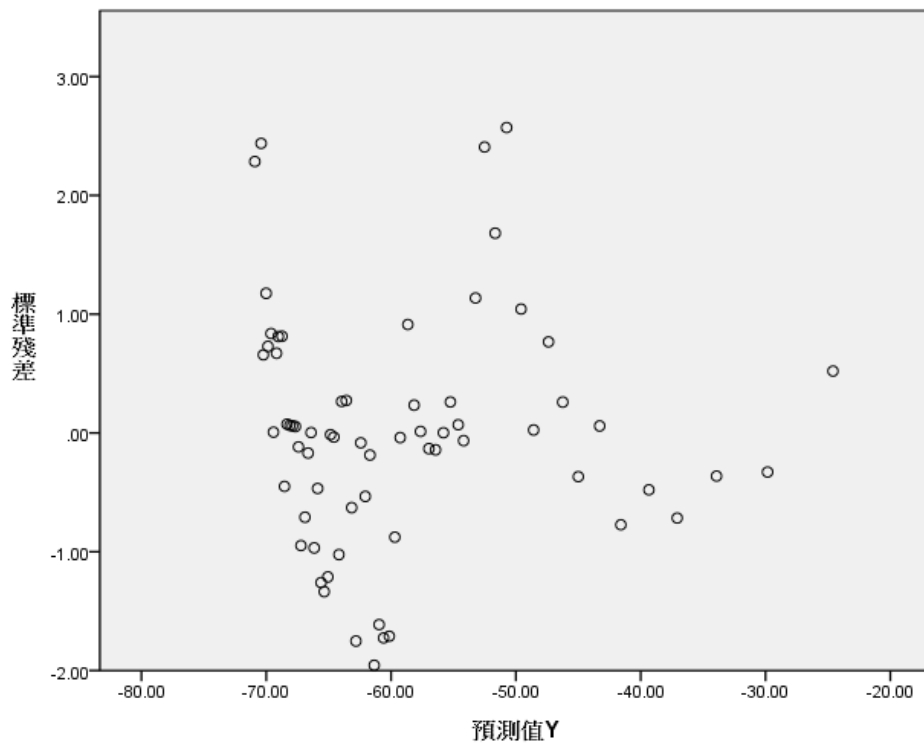


圖 5.10 安平港迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖

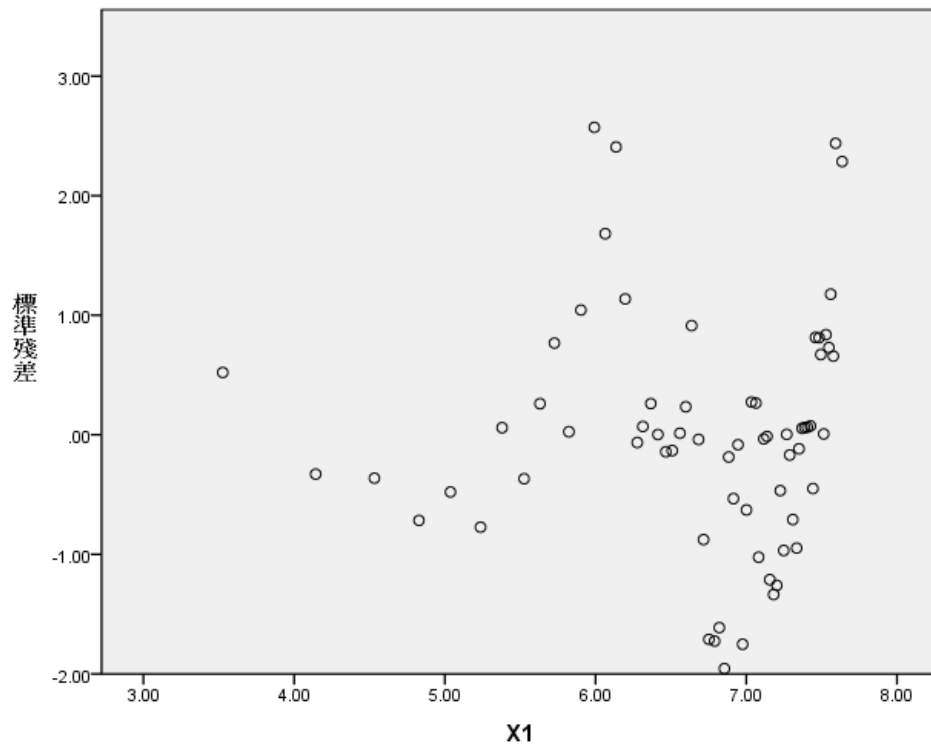


圖 5.11 安平港迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖

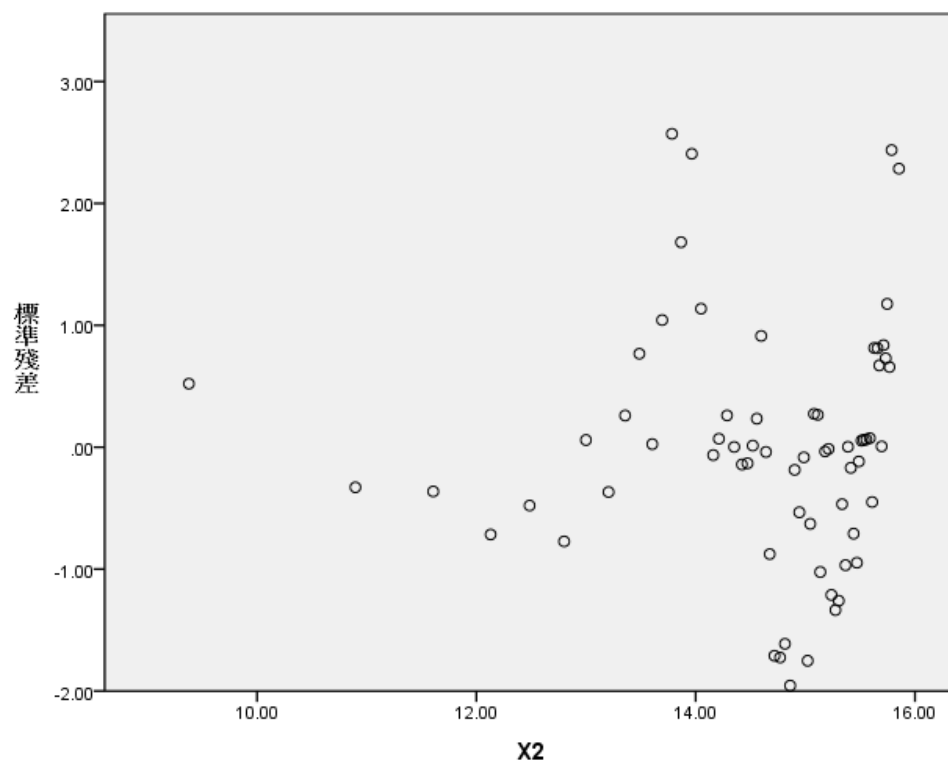


圖 5.12 安平港迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖

5.2.4 大鵬灣迴歸模式檢定

在前一章已建立大鵬灣迴歸模式如下：

$$Y = 148.699 - 62.256X_1 + 36.631X_2, R^2_{adj} = 0.943, F = 914.984 \quad (\text{式 } 5.4)$$

以下分別進行模式顯著性、配適度與妥當性檢定。

1. 顯著性檢定

查核模式的 F 檢定值：由 $F=914.984$ ($P=0.000$) 顯示模式顯著，大鵬灣的累積下陷量 Y 與 2 個影響變數 X 之間有顯著的線性關係。

查核各迴歸係數的 t 檢定值：由 b_0 的 $t = -6.714$ ($P=0.000$)、 b_1 的 $t = -20.617$ ($P=0.000$) 與 b_2 的 $t = +12.113$ ($P=0.000$)，各項 t 檢定值均達 95% 顯著水準，表示各迴歸係數均有 95% 以上的機率不等於零，則在大鵬灣迴歸模式中，覆土壓力影響因子 X_1 、地下水位作用影響因子 X_2 二者均對地層下陷量 Y 有顯著影響。

2. 配適度檢定

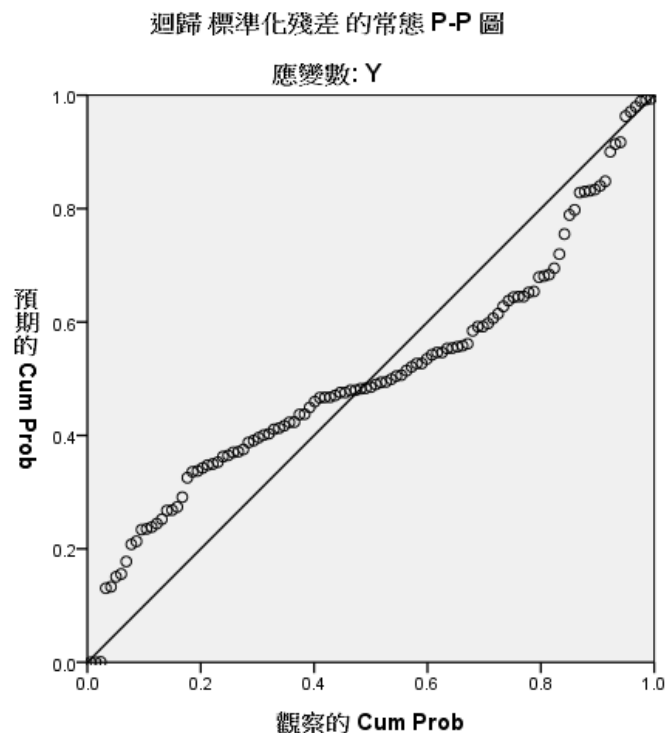
查核模式的 R^2_{adj} 值：由 $R^2_{adj}=0.943$ ，顯示模式配適度極高，大鵬灣的累積下陷量 Y 變化量之 94.3% 可以被 2 個影響變數 X 之變化所解釋。

由模式中迴歸係數估計值 $b_1 = -62.256$ 、 $b_2 = +36.631$ ，表示：當覆土壓力影響因子 X_1 增加 1 單位，其他影響變數 X_2 不變時， Y 減少 62.256 (地層下陷 62.256mm)；當地下水位作用影響因子 X_2 增加 1 單位，其他影響變數 X_1 不變時， Y 增加 36.631 (地層下陷量減少 36.631mm)。結果顯示此模式在說明土壤壓密未完成對地層下陷的影響上，是符合土壤力學基礎理論，但在地下水位下降對地層下陷的影響上，是不符合土壤力學基礎理論。

3. 妥當性檢定

模式的常態機率圖、殘差與 Y 預測值的散佈圖、殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖如圖 5.13~5.16 所示。圖中顯示：

- (1)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.14)上的點分佈情形來看，圖形近似 S 形曲線，推測 X 與 Y 之關係可能不符合線性關係。
- (2)由殘差與 Y 預測值的散佈圖(圖 5.14)上的點分佈情形來看，圖形呈外張喇叭狀，推測殘差可能不具有相同的變異數。
- (3)由各殘差散佈圖(圖 5.13~5.16)上的點分佈情形來看，圖形近似曲線形狀，推測殘差可能非彼此獨立。
- (4)由各殘差散佈圖(圖 5.14~5.16)上的點分佈情形來看，圖形看似有數個離群值，應再就此離群值做進一步查核。
- (5)由常態機率圖(圖 5.13)上的點分佈情形來看，圖形近似曲線形狀，推測模式可能違反常態分配之假設。
- (6)由殘差與解釋變數 X_1 、 X_2 的散佈圖(圖 5.15~5.16)上的點分佈情形來看，圖形近似曲線形狀，不確定模式有無未納入的重要影響因素。



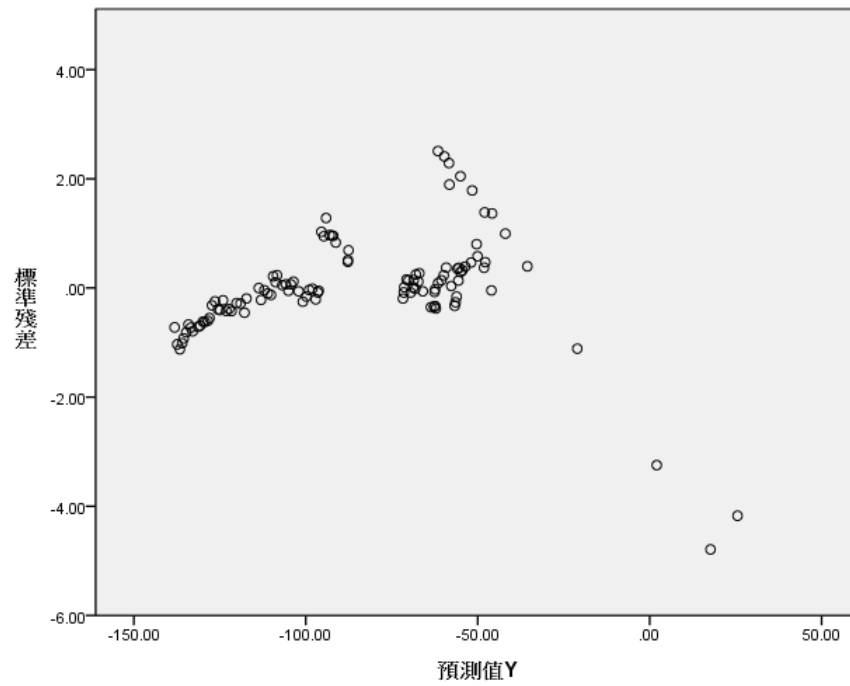


圖 5.14 大鵬灣迴歸模式的殘差與 Y 散佈圖

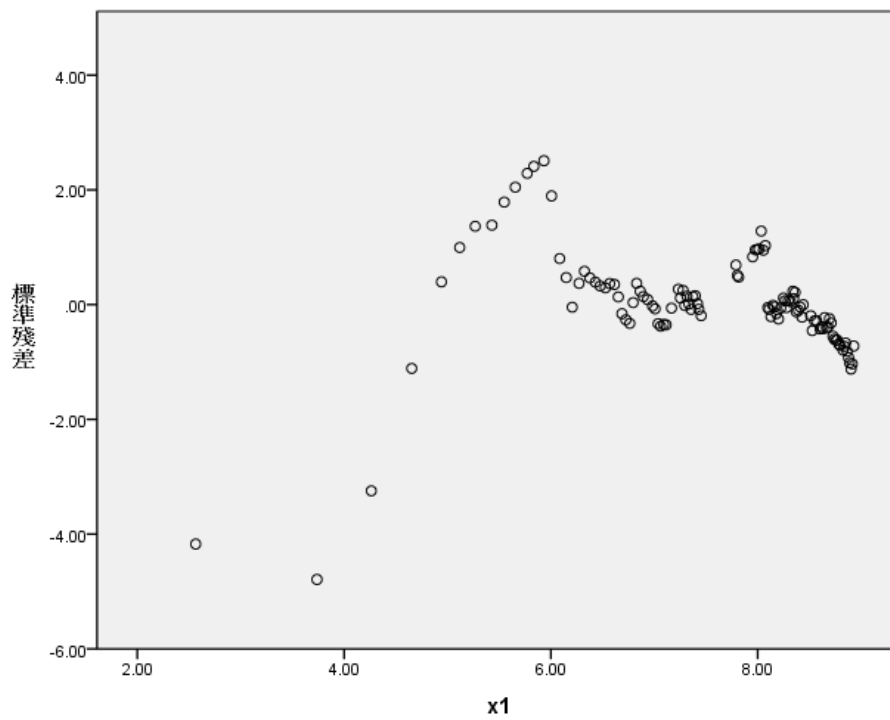


圖 5.15 大鵬灣迴歸模式的殘差與 X_1 散佈圖

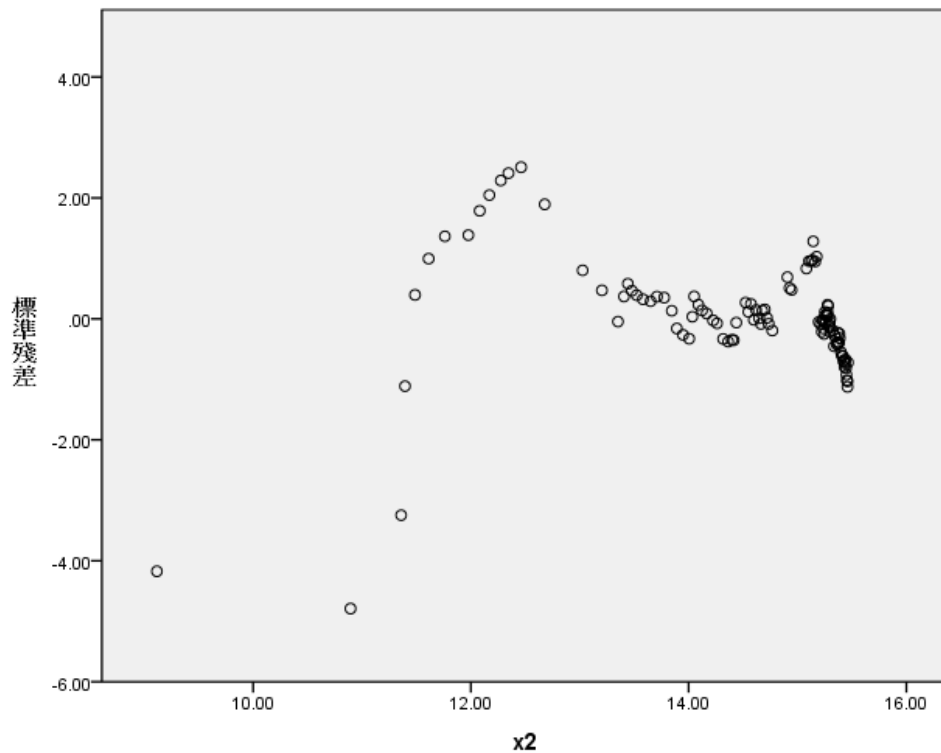


圖 5.16 大鵬灣迴歸模式的殘差與 X_2 散佈圖

5.3 檢定結果診斷

5.3.1 臺中港迴歸模式診斷

1. 顯著性檢定

整體模式有顯著線性關係，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子)、 X_3 (重大地震作用影響因子) 的影響不顯著。建議再進一步運用順向選擇法、逆向淘汰法或逐次篩選法等方法進行變數選擇，重新決定出較佳的模式變數組合。

2. 配適度檢定

整體模式配適度高，且各別影響變數的影響方向亦符合理論，模式的配適度檢定通過。

3. 妥當性檢定

模式無 3 個標準差以外的離群值，變數 X 與 Y 之關係原則符合線性關係，殘差項原則符合常態分配、彼此獨立的基本假設，但可能不符變異數為定值的基本假設。建議對變數 Y 做變數轉換，或改採加權最小平方法。

5.3.2 布袋港迴歸模式診斷

1.顯著性檢定

整體模式有顯著線性關係，各影響變數的影響亦顯著，模式顯著性檢定通過。

2.配適度檢定

整體模式配適度高，但影響變數 X_3 (重大地震作用影響因子)不配適，建議再查核變數的相關性，重新選擇適當的變數。

3.妥當性檢定

模式超過 3 個標準差以外的離群值有 1 個，變數 X 與 Y 之關係可能不符線性關係，殘差項可能不符合常態分配、彼此獨立且變異數相等的基本假設。建議再查核離群值、重新選擇適當變數或轉換為非線性模式、多項式模式。

5.3.3 安平港迴歸模式診斷

1.顯著性檢定

整體模式有顯著線性關係，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子)的影響不顯著，且模式的常數項 b_0 可能為零。建議再查核無常數項模式是否較佳，並查核影響變數 X_2 的選擇。

2.配適度檢定

整體模式配適度高，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子)不配適，建議再查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性，重新選擇適當的變數。

3.妥當性檢定

模式無超過 3 個標準差以外的離群值，變數 X 與 Y 之關係原則符合線性關係，殘差項原則符合彼此獨立、變異數相等的基本假設，但可能不符合常態分配之假設。建議先進行模式影響變數的選擇查核，確定模式後再次進行妥當性檢定。

5.3.4 大鵬灣迴歸模式診斷

1. 顯著性檢定

整體模式有顯著線性關係，各影響變數的影響亦顯著，模式顯著性檢定通過。

2. 配適度檢定

整體模式配適度高，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子)不配適，建議再查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性，重新選擇適當的變數。

3. 妥當性檢定

模式超過 3 個標準差以外的離群值有 3 個，變數 X 與 Y 之關係可能不符線性關係，殘差項可能不符合常態分配、彼此獨立、變異數相等的基本假設。建議先進行模式影響變數的選擇查核，確定模式後再次進行妥當性檢定。

綜而言之，各地測站的迴歸模式均未通過檢定，需再重新查核變數，確定模式後再做妥當性檢定。

第六章 結論與建議

本所為防災應變、避免因地層下陷造成港區內各項設施的損壞，於臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣四地設置測站，長期蒐集地層下陷與地下水位資料。過去本所以土壤力學的耦合壓密理論、單向壓密理論為基礎，發展地層下陷模擬預測模式，在構建模式中為測求土樣各項參數，需投入大量人力與經費，在目前本所人力與經費有限的條件下，本研究嘗試運用迴歸分析法，僅依據土壤力學理論與本所既有監測資料，發展出迴歸模式，期能據以說明港區地層下陷與地下水位間的關聯性，並預測未來地層下陷的發展趨勢。

本研究的結論、建議、成果效益與應用情形說明如下：

6.1 結論

本研究具體的研究成果整理如下：

1. 在建立迴歸模式時，考量實際監測數值特性與土壤力學理論關係，以選擇適當的變數。
2. 在反應變數 Y 的選擇上，考量到「總累積下陷量」較能反應長時間地下水位變動產生應力對地層下陷之整體影響，嘗試選擇以「總累積下陷量」為反應變數 Y。
3. 在解釋變數 X 的選擇，考慮到以下 4 點：
 - (1) 依據土壤力學理論的單向壓縮公式，推測地層下陷之沈陷量與壓力對數值間較有線性相關；
 - (2) 在考慮土層受到的有效應力時，考量本所測站均位於沿海地區，土層壓密尚未完成，宜將覆土壓力納入考量。由於覆土壓力所造成的地層下陷量主要隨著時間的增加而增大，在此選擇以「時間長度」來反應覆土壓力的影響；
 - (3) 考慮水位下降時土壤有效應力增加所產生之加壓變形，暫不考量水位上升時所產生的微量回脹量，選擇以地下水位下降值來反應

地下水位作用力的影響。並考慮到隨著受壓時間的增加，總地層下陷量亦會隨之增加，在分析時將受壓時間納入考量，以「累計延時總水位下降值」來反應地下水位作用力的影響；

- (4)基於地震作用力會造成土壤壓縮，在此嘗試將監測站所在地發生芮氏 5 級以上的大地震之影響納入考量，在模式中將以「指標變數」來反應重大地震作用力的影響。

4. 建立出樣本的多元直線迴歸模式為

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + e,$$

其中 Y 是總累積下陷量； X_1 是覆土壓力影響因子，以總累計時間對數值來反應； X_2 是地下水位作用力影響因子，以累計延時總水位下降對數值來反應； X_3 是重大地震作用力影響因子，將監測站所在地發生規模 5 級以上的地震，以指標變數來反應； b_0, b_1, b_2, b_3 為樣本模式迴歸係數，是母體參數 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的估計值；e 是殘差。

5. 運用統計軟體 SPSS 進行迴歸分析，就臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣四地測站資料，以最小平方法估計模式係數，分別建立各自的多元線性迴歸模式。

- (1) 臺中港迴歸模式： $Y = 21.978 - 5.713X_1 - 0.54X_2 - 19.332X_3$, $R^2_{adj} = 0.916$, $F = 424.9$

- (2) 布袋港迴歸模式： $Y = 1264.474 - 101.955X_1 - 69.949X_2 + 52.624X_3$, $R^2_{adj} = 0.931$, $F = 657.667$

- (3) 安平港迴歸模式： $Y = 3.201 - 16.197X_1 + 3.127X_2$, $R^2_{adj} = 0.915$, $F = 349.684$

- (4) 大鵬灣迴歸模式： $Y = 148.699 - 62.256X_1 + 36.631X_2$, $R^2_{adj} = 0.943$, $F = 914.984$

6. 進一步就各模式進行顯著性、配適度與妥當性檢定。診斷結果如下：

- (1) 臺中港迴歸模式

- (a) 整體模式有顯著線性關係，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子)、 X_3 (重大地震作用影響因子)的影響不顯著。
- (b) 整體模式配適度高，且各別影響變數的影響方向亦符合理論，模式的配適度檢定通過。
- (c) 模式無 3 個標準差以外的離群值，變數 X 與 Y 之關係原則符合線性關係，殘差項原則符合常態分配、彼此獨立的基本假設，但可能不符變異數為定值的基本假設。

(2) 布袋港迴歸模式

- (a) 整體模式有顯著線性關係，各影響變數的影響亦顯著，模式顯著性檢定通過。
- (b) 整體模式配適度高，但影響變數 X_3 (重大地震作用影響因子)不配適，建議再查核變數的相關性，重新選擇適當的變數。
- (c) 模式超過 3 個標準差以外的離群值有 1 個，變數 X 與 Y 之關係可能不符線性關係，殘差項可能不符合常態分配、彼此獨立且變異數相等的基本假設。建議再查核離群值、重新選擇適當變數或轉換為非線性模式、多項式模式。

(3) 安平港迴歸模式

- (a) 整體模式有顯著線性關係，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子)的影響不顯著，且模式的常數項 b_0 可能為零。建議再查核無常數項模式是否較佳，並查核影響變數 X_2 的選擇。
- (b) 整體模式配適度高，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子)不配適，建議再查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性，重新選擇適當的變數。
- (c) 模式無超過 3 個標準差以外的離群值，變數 X 與 Y 之關係原則符合線性關係，殘差項原則符合彼此獨立、變異數相等的基本假設，但可能不符合常態分配之假設。建議先進行模式影響變數的選擇查核，確定模式後再次進行妥當性檢定。

(4) 大鵬灣迴歸模式

- (a) 整體模式有顯著線性關係，各影響變數的影響亦顯著，模式顯著性檢定通過。

- (b) 整體模式配適度高，但影響變數 X_2 (地下水位作用影響因子) 不配適，建議再查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性，重新選擇適當的變數。
- (c) 模式超過 3 個標準差以外的離群值有 3 個，變數 X 與 Y 之關係可能不符線性關係，殘差項可能不符合常態分配、彼此獨立、變異數相等的基本假設。建議先進行模式影響變數的選擇查核，確定模式後再次進行妥當性檢定。

6.2 建議

1. 由於各地測站的迴歸模式均未通過檢定，建議後續先查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性，重新選擇適當的變數以建立模式，之後再依序就各模式進行顯著性、配適度與妥當性檢定。

6.3 研究成果之效益

1. 測試運用迴歸分析法，僅依據土壤力學理論與本所既有地層下陷監測資料，發展出迴歸模式，來說明港區地層下陷與地下水位間的關聯性。
2. 可做為本所後續再建立地層下陷迴歸模式之先期研究。

6.4 提供政府單位應用情形

1. 可提供交通部、航港局與港務公司，做為研究各港區地層下陷發展趨勢分析之參考。
2. 可做為本所辦理地層下陷、港區防災等相關研究後續探討與運用之參考。

參考文獻

1. 陳志芳、謝明志(2019)，港區地震監測及地層下陷調查分析研究，初版，交通部運輸研究所印，臺北市。
2. 謝明志、陳志芳、張道光、曾文傑、羅建明(2016)，西南沿海地區地層下陷調查及基本資料建置研究(1/2)，初版，交通部運輸研究所印，臺北市。
3. Lay, S.Y. and Hsieh, M.J. (1995), "The step-loading model of subsidence induced by groundwater level changes with time." Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence The Hague.
4. 賴聖耀、謝明志、李豐博、陳志芳(1998)，「布袋港地層下陷監測研究」，第二十屆海洋工程研討會論文集，國立海洋大學。民國 87 年 11 月
5. 陳志芳、賴聖耀(2002)，「布袋港地下水位及地層下陷監測研究」，第二十四屆海洋工程研討會。
6. 中央氣象局網站(<https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/page/disaster/3>，資料引用時間：2019.11.17)。

附錄一

期末審查意見及辦理情形說明表

期末審查意見及辦理情形說明表

審查意見	處理情形
林炳森委員	
本計畫運用迴歸分析，精進過去僅依據土壤力學理論與既有地層下陷監測資料發展預測地層下陷與地下水位關係模式，具工程實用價值，但下列應修正：	感謝肯定與建議。
1. 迴歸模式應分淺層與深層。	1. 感謝建議，納入後續研究考量。
2. 參數選定與非線性模式應再加強。	2. 感謝建議，納入後續研究考量。
3. 參考文獻：(1)應多引用國外與其他研究單位之文獻；(2)不要列施國欽。	3. (1)感謝建議。(2)遵照辦理。
4. 結論與建議應重新整理，如第 1 點不能當結論。	4. 遵照辦理。
5. 英文 abstract：(1)不要用 we；(2)部份無動詞。	5. (1)遵照辦理。(2)已修改英文摘要。
6. 地震作用力，不宜採用震度，如：4、5、6。	6. 感謝建議，納入後續研究考量。
柯永彥委員(書面意見)	
1. 第三章，雖地層下陷與地下水位監測站為過去建立，仍應簡介其配置與採用之儀器規格，尤其是儀器量測原理與精度，以便研判量測值合理性。	1. 感謝建議，納入後續研究考量。
2. 3.1 p.3-2，文中提及儀器卡管，是否曾進行其他檢測方式確認卡管原因？卡管是否可能與地層下陷或地體變形有關？	2. 文中內容係直接引用本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」報告，此一問題屬該計畫探討範疇。
3. 第三章，地層下陷監測井之成果均以地表至特定深度之累積沉陷曲線表示，但文中經常討論到部分深度範圍之累積沉陷量(如 p 3-4: “140~200m 間	3. 感謝建議，納入後續研究考量。

審查意見	處理情形
之沉陷量約 34cm，占總沉陷量之 45%以上”)，可考慮補充特定時間點之“地下不同深度沉陷貢獻分佈曲線”圖形，將更能清楚呈現出地層下陷之特性。	
4. 4.2.1，變數選擇宜補充代表性前人研究成果，有助於檢視本研究所採用變數與其間關係之合理性。	4. 感謝建議，納入後續研究考量。
5. 4.2 p.4-3~4，關於覆土壓力之影響，本研究首先基於壓密理論認為沉陷量與壓力對數值線性相關，但又以覆土壓力造成之下限量隨時間增加而增大之理由，而僅以時間長度反映覆土壓力之影響，但覆土壓力變化量主要影響壓密沉陷總量，經過時間則決定了沉陷量發展之程度，在物理意義上有所差異；此外，若根據壓密理論，沉陷量發展程度與經過時間並非呈線性關係。在此宜增補更詳盡之理論說明，以確認此簡化假設是否合理。	5. 感謝建議，納入後續研究考量。
6. 6.2，此處建議後續先查核各變數之相關性，事實上對於此類研究，此應為先行工作。	6. 感謝建議，納入後續研究考量。
林佑任委員	
1. 本研究站在土地資源利用與防災的立場來看是很有意思的研究，對於地下水位高含水量高的地區尤其濱海地區，為避免土壤液化用點井抽水利用機械抽排製造水力坡降，降低孔隙水壓提高有效應力，讓土層因排水而強迫土層壓密收縮本來就是做表層約 20 米內地質改良預防液化並提高乘載力的一種配套工法，目的就是要土壤收縮發生沉陷現象，但是為了作為水源的目的採用更深層的大量並長期的抽水，將造成大範圍的土地下陷連帶影響土地上的所有設施可能因差異沉陷而破壞，尤其港口碼頭與倉棧設施的高程如果因此降低將造成遇到颱風暴潮的淹水機率提高，影響營	1. 感謝建議。

審查意見	處理情形
運造成損失。	
2. 如果能夠推估出地下水位變動與下陷之關係，對於水資源利用與土地利用的管理會有幫助，但因為影響下陷的因素很多，除了大尺度的因素如大區域的地下水位變動因素、地震因素或新填區持續發揮土壤壓密效果外，觀測井附近的工程施工、地質改良或土地利用方式等小尺度的影響因素也會影響觀測成果，建請留意。	2. 感謝建議。
3. 本研究屬於長期性的觀察研究，要確立下陷與地下水位的關係不太容易，期待可以藉此研究-以長期的調查迴歸分析研究結果由趨勢的發展以及早警示水資源與土地利用方式危機供相關中央單位的決策參考，避免下陷因素也影響港口經營及政府投資的浪費。	3. 感謝建議。
4. 請問臺中港 94 年 8 月下陷監測井儀器卡管及影響測量深度的原因？	4. 文中內容係直接引用本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」報告，此一問題屬該計畫探討範疇。
5. 請問同一口地下水位監測井內各不同深度的不同水壓計，是否有互相干擾情形，如何確認各分層不受鄰層水互通之干擾。	5. 文中內容係直接引用本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」報告，此一問題屬該計畫探討範疇。
6. 就臺中港部分 P3-2 有關 0~90m 深之沉陷量約 4.6 公分應該是佔總沉陷量 79.3%或可以描述將近 80%，文中描述本深度範圍佔總沉陷量 80%"以上"有誤。	6. 感謝指正，已修正。

審查意見	處理情形
7. 請問臺中港#26 的監測井在 921 之前雖然只有約 3 個月資料，可否拿出來分析比對一下地震前與地震後各自的穩定期期間其自然壓密的現象有無差異。	7. 實際監測數據僅有 3 筆，在統計分析上難獲得具顯著水準的分析結果。
8. 地下水位監測井 93 年 9 月到 94 年 5 月資料有大幅度變化的原因為何及 97 年 9 月約到 98 年 9 月造成缺資料的原因及問題排除方式。	8. 文中內容係直接引用本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」報告，此一問題屬該計畫探討範疇。
9. 看起來臺中港的地下水壓力水位長期而言似乎有穩定上升之趨勢，但是本研究其他港或地區則都是下降趨勢，請問可能的原因分析。	9. 文中內容係直接引用本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」報告，此一問題屬該計畫探討範疇。
10. 就布袋港部分 p3-4 有關 140~200m 深之沉陷量約 34 公分應該是佔總沉陷量 48%以上而非 45%以上，或可以描述將近五成。	10. 感謝指正，已修正。
11. P3-6 最後一段描述各水層例如"34m 水位為第 1 含水層之水位"容易被誤解為 34m 本身就是水位，宜寫成"深度 34m 之水位為第 1 含水層之水位"，以下各深度的描述也是。	11. 感謝指正，已修正。
12. P3-6 最後一段描述"以旱季時，水位相對較低，表降雨減少時，超抽地下水更為嚴重"，但是壓力水位圖顯示低水位期約在 4 月到 8 月間，應屬於中南部的梅雨及颱風的豐水期，並非旱季，可能需再進一步分析原因。	12. 文中內容係直接引用本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」報告，此一問題屬該計畫探討範疇。

審查意見	處理情形
13. 布袋港 86 年就有資料，因此本研究除了明確觀察到 99 年甲仙地震的影響，是否可以再分析之前 921 地震的影響。	13. 感謝建議，納入後續研究考量。
14. p3-9 有關 190~300m 深之沉陷量 9.5 公分應該是佔總沉陷量 10.3%，而非 1%。	14. 感謝指正，已修正。
15. P3-12 安平港部分有關 0~56m 深之沉陷量 6.7 公分應該是佔總沉陷量 91.78%，而非 88%。	15. 感謝指正，已修正。
16. 安平港下陷監測井深度達 250m，為何僅分析地表下到 200m 的資料。	16. 文中內容係直接引用本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」報告，此一問題屬該計畫探討範疇。
17. P3-13 描述各水層例如"40m 及 75m 為第 1 含水層之水位"本身就是水位，宜寫成"深度 40m 及 75m 為第 1 含水層之水位"，以下各深度的描述也是。	17. 感謝指正，已修正。
18. 大鵬灣部分，P3-15 有關 0~51.3m 深之沉陷量 10.4 公分應該是佔總沉陷量 71.7%，而非 80%以上。	18. 感謝指正，已修正。
19. 由本研究結果，臺中港是下陷最輕微之區域，而布袋港是下陷最嚴重下陷速度最快區域(約為臺中港的 10 倍)且布袋港是深層超抽須特別注意，其次是大鵬灣再其次是安平港。臺中港與安平港同樣屬於淺層區下陷，臺中港下陷甚微安平港下陷速度是臺中港的 2~3 倍。建議本研究可就所獲各不同區域之不同現象做比較與原因說明。	19. 感謝建議。
陳志芳委員	
1. 本計畫是蒐集港研中心在各港區歷年量測所得之地層下陷與地下水位資料，利用 SPSS 統計軟體進	1. 感謝肯定。

審查意見	處理情形
行探討下陷與水位之關聯性，初步所得結果值得參考。	
2. 各港區下陷監測站設置完成後，測站孔位回填土壤尚未完全穩定，所以初期下陷量較大。早期的量測時間是每個月中旬去量測一次，後來是 2~3 個月量測一次，分析期程需要一致。	2. 感謝建議，納入後續研究考量。
3. 監測站下陷與水位是採分層土層的資料，各土層土壤性質不一樣，也需要一併考慮。	3. 感謝建議，納入後續研究考量。
4. P4-5,表 4-1 標題建議修正為「重大地震在本所下陷監測站的震度」，並增加 2010 年 03 月 04 日甲仙地震資料，各測站震度為臺中港 4，布袋港 5，安平港 5，大鵬灣 4。	4. 感謝建議，表 4-1 標題已遵照修正，甲仙地震資料納入後續研究考量。
5. 建議各港迴歸模式未來繼續檢核。	5. 感謝建議。
主席柯正龍科長	
1. 參考文獻中第 4、5 項文獻的年代久遠，請改參考較近期的文獻。	1. 遵照辦理。

附錄二

期末報告簡報資料



MOTC-IOT-108-H1DA001g

地層下陷與地下水位 之關聯性研析

研究人員：謝幼屏

港研中心「一科108年自辦研究計畫期末審查會議」
民國108年12月9日

P.1

報告大綱

- 一、緒論
- 二、地層下陷影響因素探討
- 三、監測資料說明
- 四、關聯模式建立
- 五、模式檢定
- 六、結論與建議

P.2



一、緒論

■ 研究緣起與動機

- 臺灣西南沿海地區之地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱，壓密固結尚未全部完成。
- 因附近地區地下水抽取、大規模海埔新生地回填及結構物荷重或地震力等因素，可能造成地層下陷，影響公共工程及港區各項設施之安全。
- 本所為維護港區工程及設施之安全，在臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等四個地區內設置監測站，長期蒐集地層下陷、地下水壓資料。

P.3

- 
- 本計畫以此一長期監測資料為基礎，針對地層下陷與地下水位之關聯性，做深入的加值分析探討。
 - 期以臺灣本土的長期實測數據述明地層下陷與地下水位的具體關係，更明確掌握各地區之地層下陷未來可能發展態勢。

P.4



■ 研究目的

- 將本所進行的地層下陷監測資料做進一步深入分析，以實際監測資料建立具有顯著性、配適度與妥當性的迴歸模式。
- 具體說明臺灣西南地區地層下陷與地下水位間的關聯性，並預測未來地層下陷的發展趨勢。
- 研究成果可提供交通部、航港局與港務公司參考，做為確掌各港區地層下陷發展趨勢，以防災應變，提早因應準備之用。

P.5

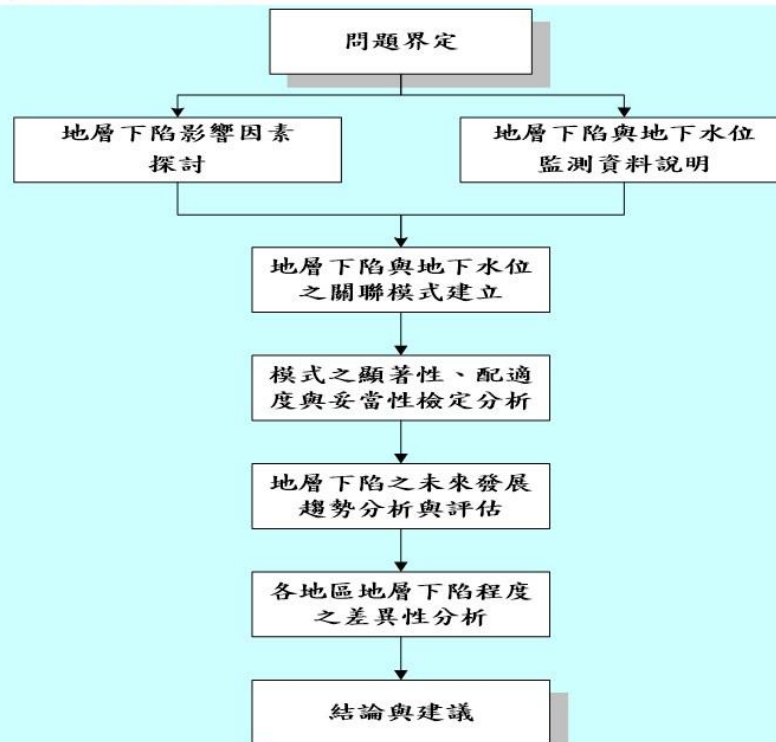


■ 研究範圍、對象與利害關係人

- 研究範圍
 - 本所設置監測站的臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣等四個地區。
- 研究對象
 - 本所地層下陷與地下水位的長期監測資料。
- 利害關係人
 - 港口地區若發生地層下陷，主要將造成港區內各項設施毀損，進而影響港區安全。
 - 因此，本案利害關係人為港口的主管機關交通部，以及部屬單位航港局、港務公司。

P.6

研究流程圖



P.7

■ 研究方法

－ 文獻分析法

- 關於地層下陷影響因素之探討，透過蒐集相關文獻與參考資料，將地層下陷的成因與理論依據做綜整分析

－ 現況分析法

- 關於地層下陷與地下水位監測資料說明，將按現況具體說明各地監測站的監測資料。

－ 迴歸分析法

- 關於關聯模式建立、模式檢定與未來趨勢分析等工作，將運用統計軟體，建立各地區之地層下陷與地下水位的迴歸模式、進行模式檢定，並推估未來變化。

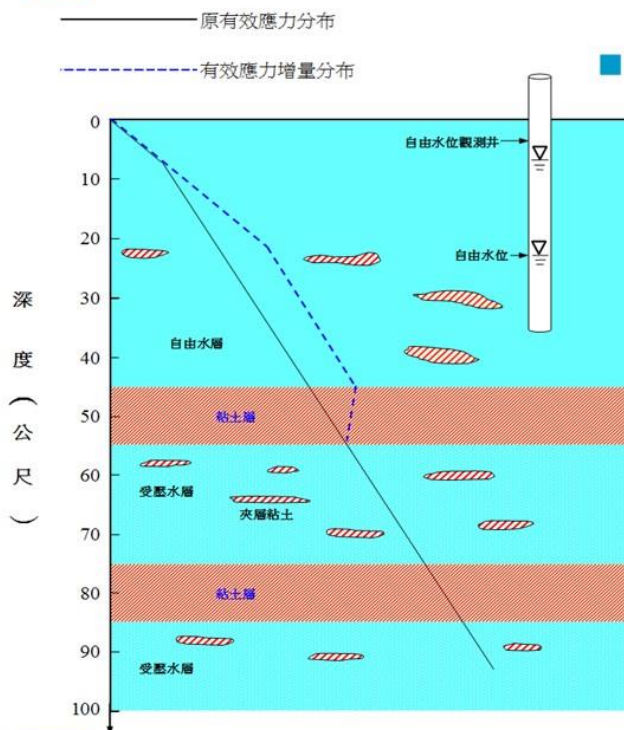
P.8

二、地層下陷影響因素探討

■ 2.1 地層下陷行為

- 無論是超抽地下水、地表荷重增加，或是地震作用影響所造成的地層下陷，從**土壤力學**的觀點來看，根本原因都是**土壤受到壓力**。
- 也就是說土體在土層中受到比原來存在土層中有效應力**更大的應力**而產生壓縮。
- 土壤受壓變形的行為是：當土壤受壓後，內部的**孔隙水及空氣**逐漸排出，造成土壤**越壓越緊密**(壓密)，土體愈來愈縮小。
- 此一**土壤壓密現象**，將使地層表面產生**沈陷**或**變形**，也就是所謂的地層下陷。

P.9



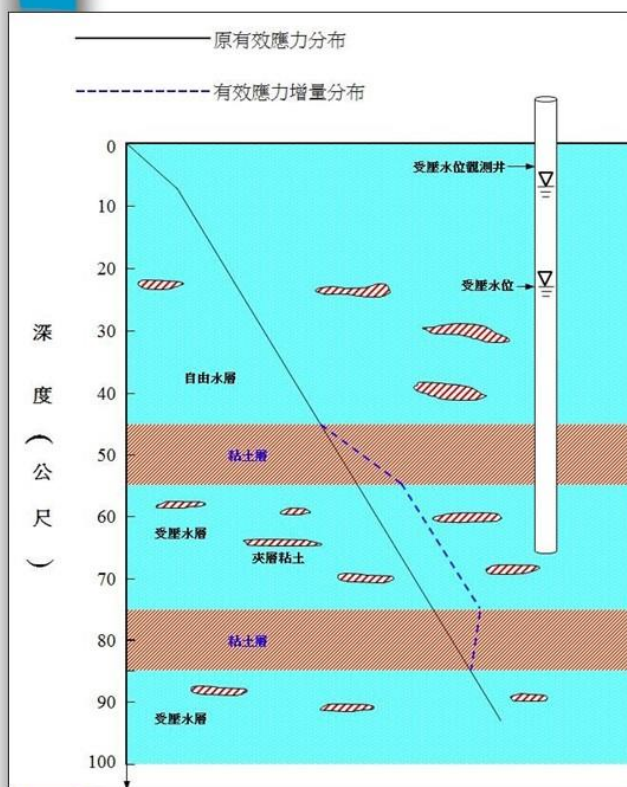
■ 2.2 超抽地下水之下陷

— 淺層沉陷(自由水位下降)

- 若由於自由水層受到過量抽水，引致自由水位下降，
- 其有效應力增量僅分布於最淺層自由水層及其下之難透水層(Aquitard)或粘土層，
- 而其他之受壓水層(Aquifer)及粘土層則無有效應力增量產生。

自由水位下降引致之有效應力增量分布

P.10

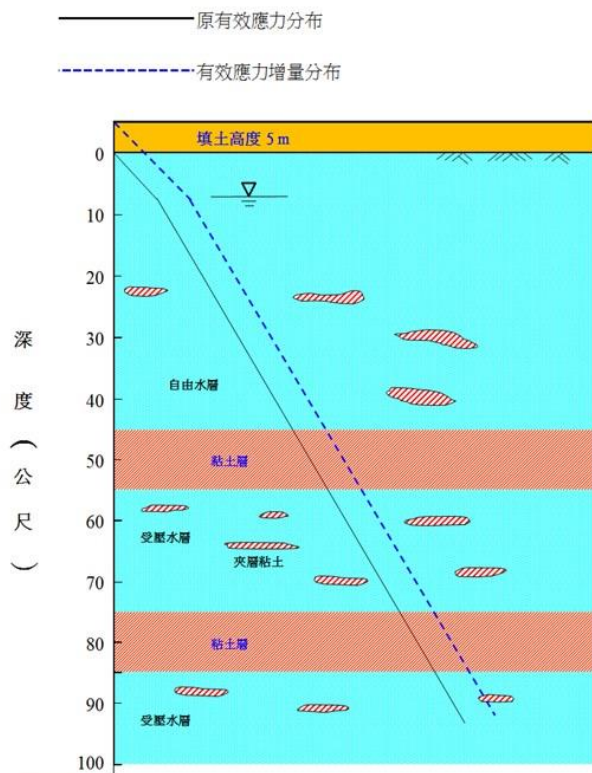


受壓水位下降引致之有效應力增量分布

P.11

— 深層沉陷(受壓水位下降)

- 若由於受壓水層受到過量抽水，而致受壓水位下降，
- 其有效應力增量，除分布於該超抽受壓水層外，並分佈於其上下之難透水層或粘土層，
- 而最淺層之自由水層及其他之受壓水層與粘土層則無有效應力增量產生。

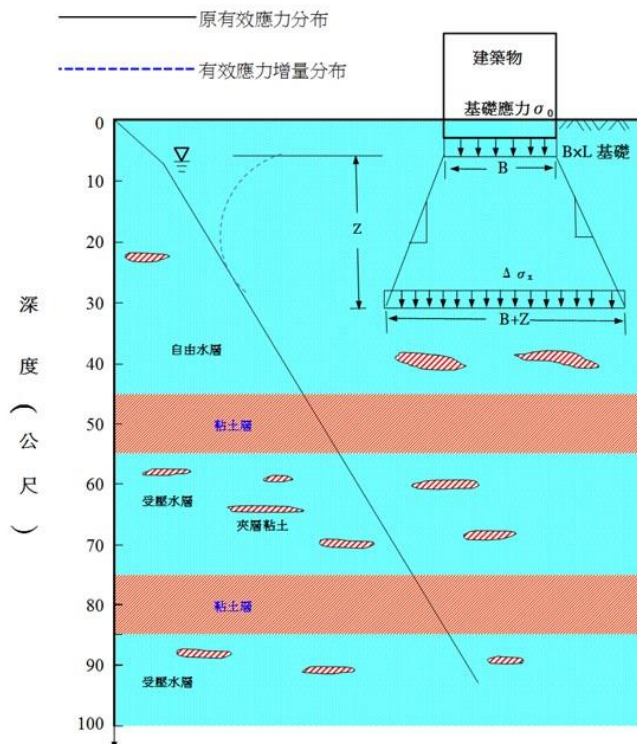


填土荷重引致之有效應力增量分布

P.12

■ 2.3 地表荷重之下陷

- 填土與建造結構物也會因為荷重的增加，土壤受壓力作用後，土壤孔隙中的水份及空氣被擠壓而向外排出，孔隙因而減少，顆粒排列變得更緊密，
- 土壤因壓縮變形後將造成基礎的沉陷，其有效應力增量分布情形如圖所示。



結構物荷重引致之有效應力增量分布

P.13

■ 2.4 地震引起之下陷

— 不同土壤在受到地震之動態作用力時，所產生的體積壓縮情況不同：

- 乾燥或低飽和砂土：

因孔隙中空氣迅速被壓縮擠出，立即產生體積壓縮現象

- 飽和砂土：

因孔隙水無法立即排出，而有孔隙水壓累積增大現象，俟震動過後，則隨著超額孔隙水壓之消散，有再壓密現象而產生體積壓縮。

- 飽和粘土：

在受到震動時，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象發生，唯其孔隙水壓消散較慢，乃發生長期沉陷，且其沉陷量較砂土層為大。

P.14

三、監測資料說明

- 在本章分別說明臺中港、布袋港、安平港與大鵬灣4個地區監測站現況與各站監測資料。
- 資料引用自本所「港區地震監測與地層下陷調查分析研究」(陳志芳、謝明志，2019)報告。

P.15

■ 3.1 臺中港監測站

臺中港監測站

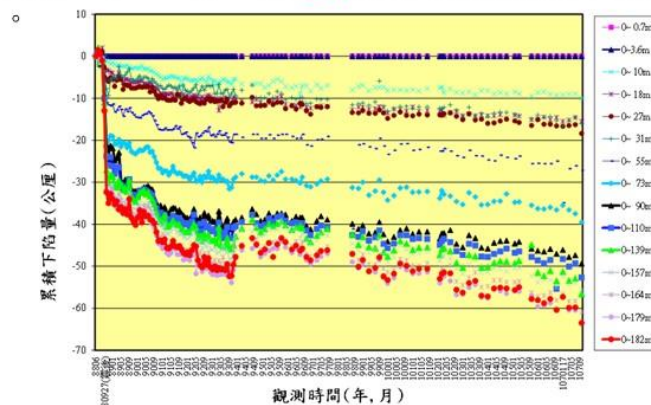
- 位置：26號碼頭後線綠地
- 200m地層下陷監測井1孔
- 200m地下水位監測井1孔



P.16

— 地層下陷監測

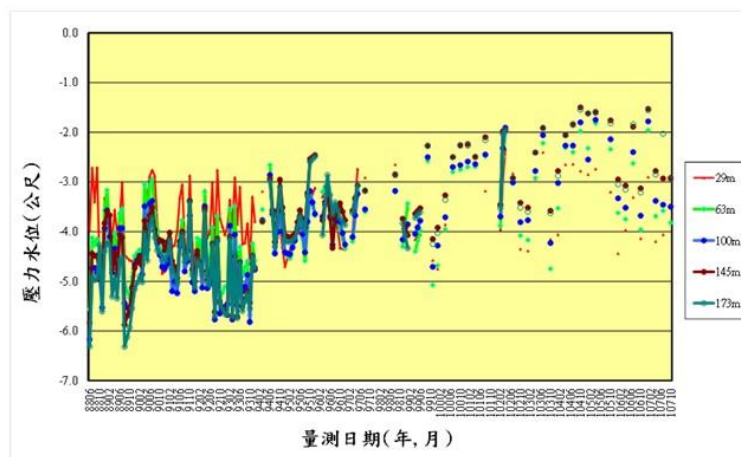
- 監測井：**200m電磁式分層地層下陷監測井**，設置**17**個沈陷感應磁環(深度0、3、10、18、27、31、54、73、90、110、138、157、164、179、181、189、199m)。
- 監測資料：
 - 民國88年6月~106年7月，**0~181m**的**累積總沉陷量**為**5.8公分**，其中**0~90m**深之沉陷量約**4.6公分**，佔總沉陷量**80%**以上。
 - 民國88年9~10月，因**地震**產生之總沉陷量**3.2公分**最多。



P.17

— 地下水位監測

- 監測井：**200m分層水壓觀測井**，共埋設**5**支**開放式水壓計**，其深度分別為29m、63m、100m、145m、173m。
- 監測資料：88年6月~91年6月自動量測；88年7月~93年12月每月1次手動量測。94年1月~迄今每兩個月1次手動量測。97年8月~98年8月因卡管而缺記錄。



P.18

■ 3.2 布袋港監測站



200m監測站

- 位置：港區第二期海埔地之西北角
- 地層下陷監測井1孔
- 地下水位監測井2孔

300m監測站

- 位置：商港近南堤之砂石碼頭區
- 地層下陷監測井1孔
- 地下水位監測井2孔

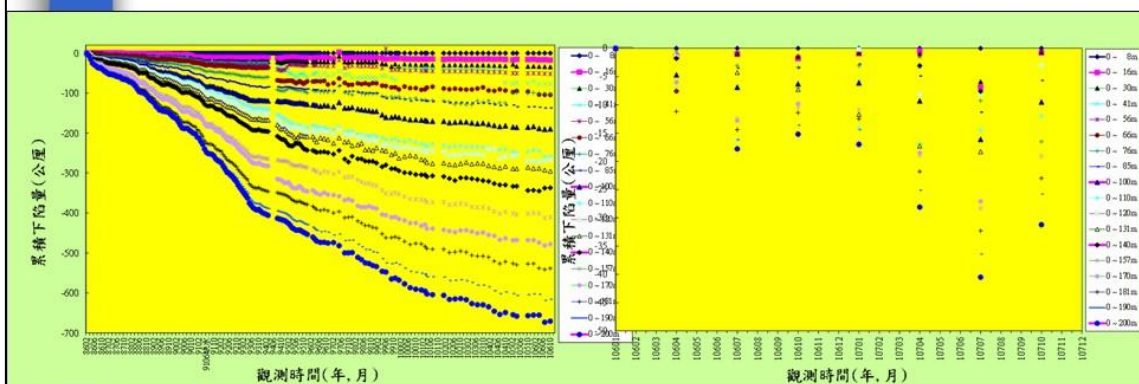
400m監測站

- 位置：商港區西北角
- 地層下陷自動監測站

P.19

— 200 m監測站之地層下陷監測

- 監測井：200m電磁式分層地層下陷監測井，設置18個沈陷感應磁環(深度8、16、30、41、56、66、76、85、100、110、120、131、140、157、170、181、190、200m)。
- 監測資料：民國86年2月~107年10月(21年8個月)，地表下8~200m間之沈陷總量約為70cm，而其中140~200m間之沈陷量約34cm，占總沈陷量之45%以上，由此資料顯示，布袋港之沈陷屬於深層沈陷。

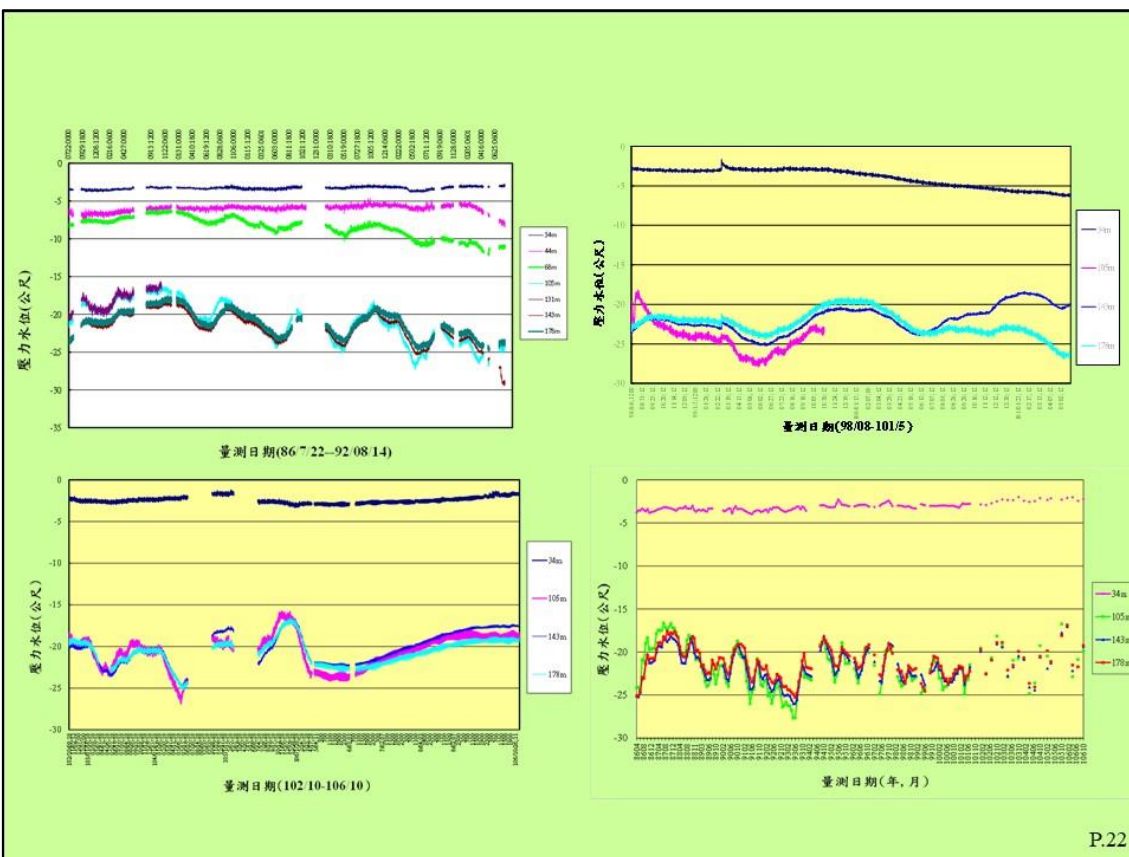


P.20

— 200 m監測站之地下水位監測

- 監測井：2孔分層水壓觀測井，共埋設7支開放式水壓計，其深度分別為34 m、44 m、68 m、105 m、131 m、143 m、178 m。
- 監測資料：
 - 86年7月~迄今自動量測。
 - 86年4月~93年12月每月1次手動量測。94年1月~迄今每3個月1次手動量測。(4支開放式水壓計：34 m、105 m、143 m、178 m)

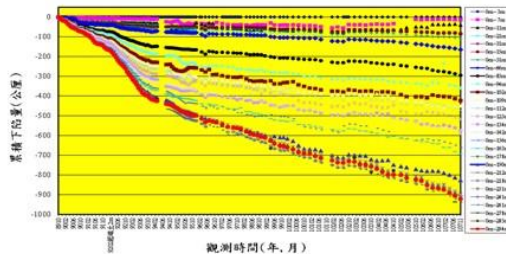
P.21



P.22

— 300 m監測站之地層下陷監測

- 監測井：300m電磁式分層地層下陷監測井，設置30個沈陷感應磁環(深度3、7、11、21、31、35、51、66、83、94、102、109、112、123、134、142、156、163、178、190、202、212、218、231、241、261、278、285、294、300m)。
- 監測資料：民國89年10月~107年10月，18年期間之累積總沉陷量約92公分。各分層沉陷量大約可區分為7~66m、66~102m、102~190m、190~300m等4個層次來分析，66~102m之累積沉陷量25.8公分，約占總沈沉陷量之29%。其中以102~190m之沉陷量為40.3公分所占比例最大，約占總沉陷量之43.8%，190~300m之沉陷量較少為9.5公分，約佔總沉陷量之1%。

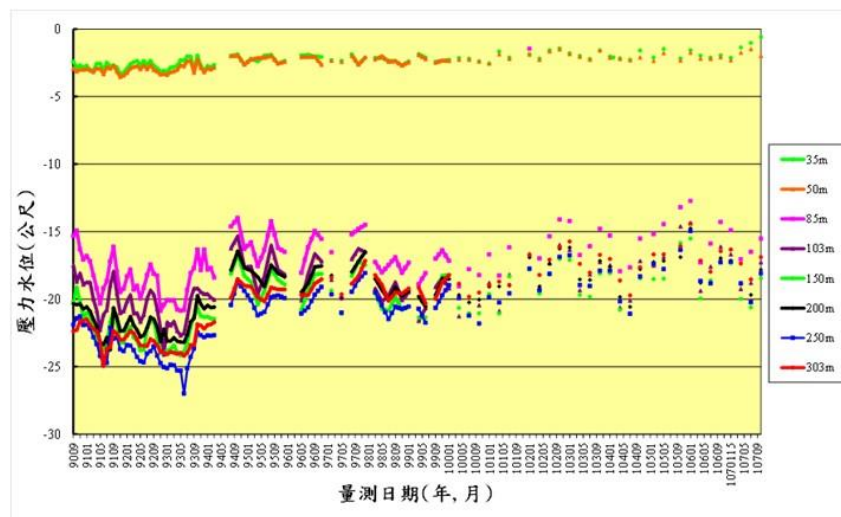


P.23

— 300 m監測站之地下水位監測

- 監測井：設置2孔深層水壓監測井，分別為100公尺及300公尺，每孔埋設4支水壓計，總共8支，其深度分別為35m、50m、85m、103m、150m、200m、250m、303m。
- 監測資料：90年9月~迄今，採手動量測。
 - 35及50m之水壓計水位介於-2.4~-3.5m之間，屬淺層水位，
 - 85及103m為較深層，其水壓計之水位介於-15~-24m之間，且屬同一含水層，其中以91年5月及93年6月之水位分別降至-22m及-24m較明顯變化，
 - 150m及200m之水壓計水位介於-19.2~-23.3m之間，亦屬同一含水層，
 - 250m水壓計之水位介於-21~27m之間，而303m之水位又屬另一含水層，其水壓計水位介於-22~-25m之間變化。

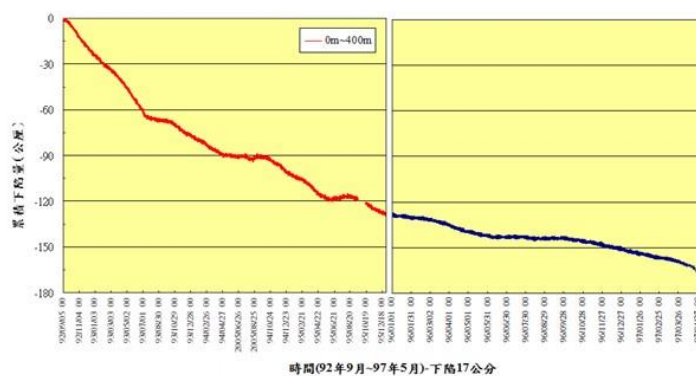
P.24



P.25

— 400 m監測站之地層下陷監測

- 監測站：**自動監測**，每6小時自動記錄一筆。
- 監測資料：民國92年9月~97年4月的累積下陷量約**17.2公分**，民國94年7月~107年5月的累積下陷量約**26公分**，合計總累積下陷量**43.2公分**。(其間因儀器故障而缺資料)。



P.26

■ 3.3 安平港監測站

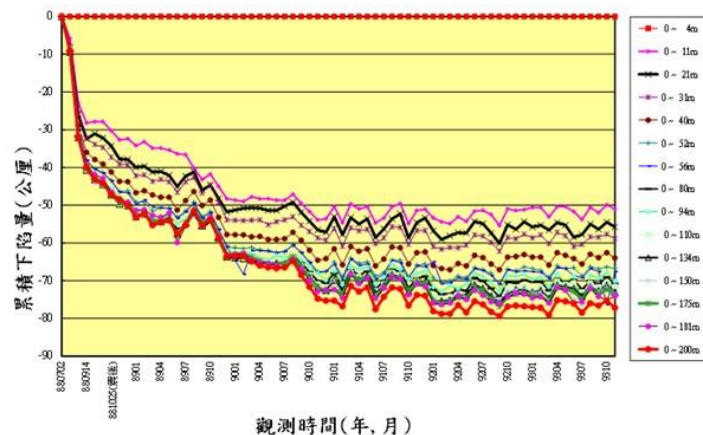


- 安平港監測站**
- 位置：港區內規劃之觀光遊憩商業區(II)後線綠地
 - 250m地層下陷監測井1孔
 - 200m地下水位監測井1孔

P.27

— 地層下陷監測

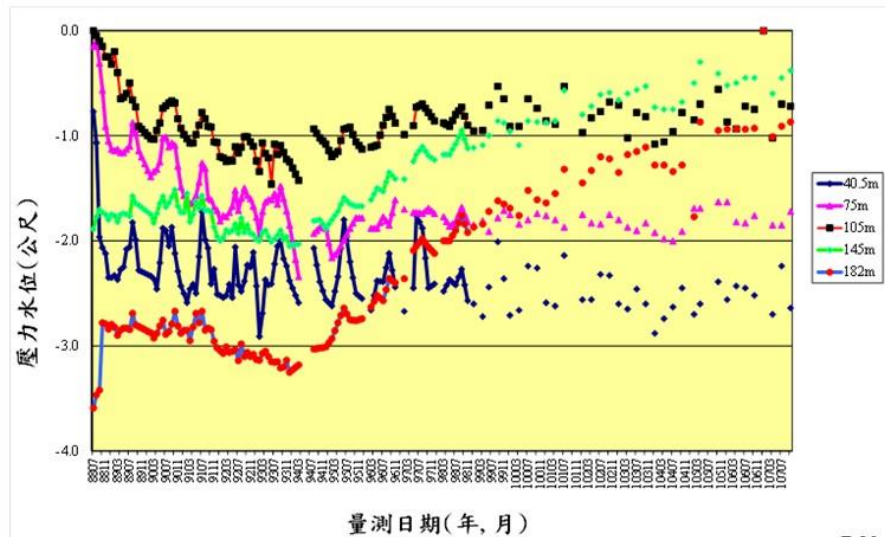
- 監測井：250m電磁式分層地層下陷監測井，設置22個沈陷感應磁環(深度0.6、4、10、20、30、40、52、55、79、94、110、133、149、174、180、200、210、220、230、239、248、249m)。
- 監測資料：民國87年3月~94年3月(5年8個月；因儀器故障而停止量測)，0~200m的累積總沉陷量為7.3公分，其中0~56m沉陷量約6.7公分，佔總沉陷量88%以上。



P.28

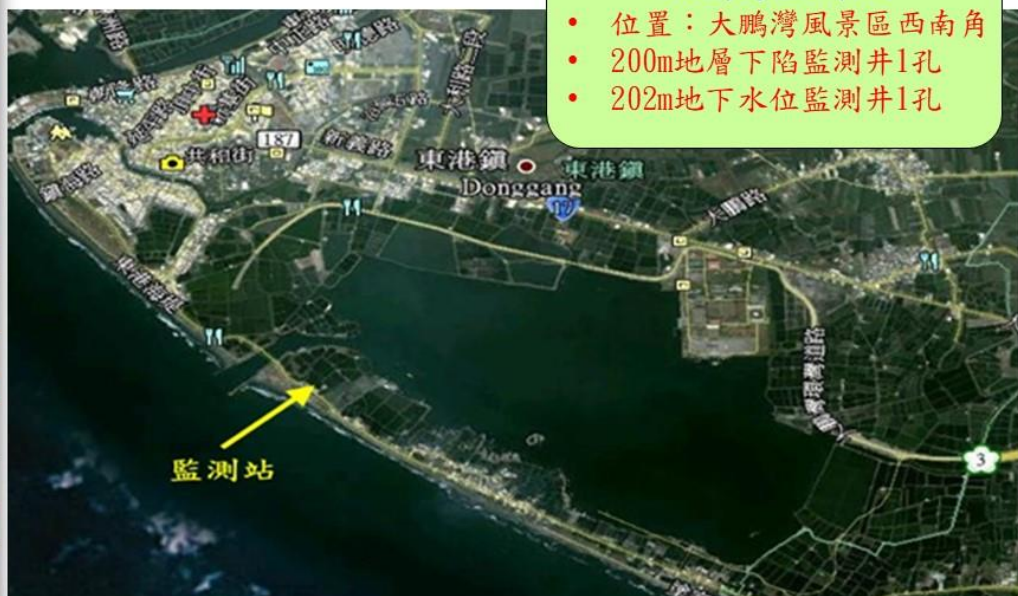
— 地下水位監測

- 監測井：200m分層水壓觀測井，共埋設5支開放式水壓計，其深度分別為40m、75m、105m、145m、182m。
- 監測資料：88年7月~98年12月每月量測1次，99年1月~迄今每3個月量測1次。)



P.29

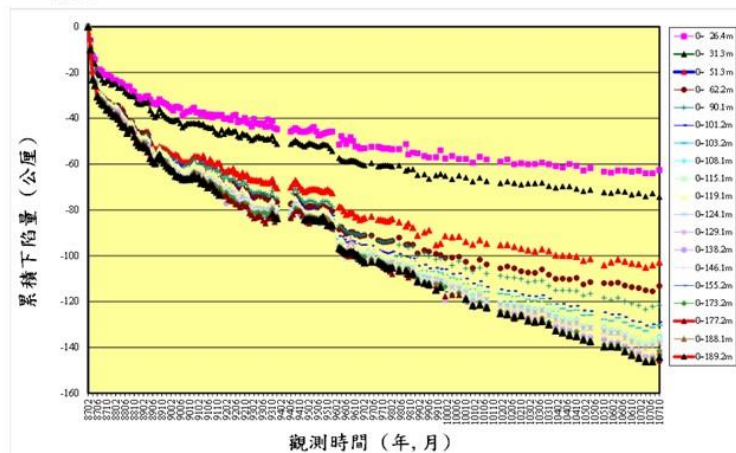
■ 3.4 大鵬灣監測站



P.30

— 地層下陷監測

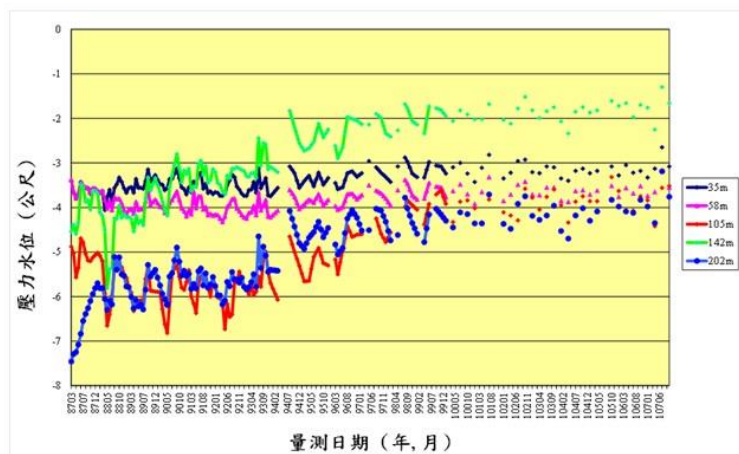
- 監測井：200m電磁式分層地層下陷監測井，設置22個沈陷感應磁環(深度4、26、31、51、55、62、90、101、103、108、115、119、124、129、138、146、155、161、173、177、188、189 m)。
- 監測資料：民國87年3月~107年7月的累積總沉陷量為14.5公分，其中0~51.3m沉陷量約10.4公分，佔總沉陷量80%以上。



P.31

— 地下水位監測

- 監測井：202m分層水壓觀測井，共埋設5支開放式水壓計，其深度分別為35m、58m、105m、142m、202m。
- 監測資料：87年3月~107年6月(早期量測採手動與自動2方法並行，後來則僅採手動量測，每3個月量測1次。)



P.32

四、關聯模式建立

■ 4.1 模式構建方法

— 採用迴歸模式理由

- 過去本所以**耦合壓密理論**、**單向壓密理論**為基礎，發展地層下陷模擬預測模式
 - ➔如：Lay and Hsieh (1995)、賴聖耀等人(1998)、陳志芳與賴聖耀(2002)等。
- 在構建模式中需**測求**土樣的**各項參數**，包括初始孔隙比、壓縮係數、壓縮指數...
 - ➔需投入大量人力經費，做詳細調查與分析
- 在人力與經費有限條件下，嘗試採用迴歸分析法
 - ➔僅依據土壤力學理論與本所既有資料建立模式。

P.33

— 迴歸(Regression)

- 研究多個變數間的關係，發展建立一個統計模式，
- 模式可以由一個或數個解釋變數X的值，來說明或預測某一反應變數Y的值。

— 迴歸分析(Regression Analysis)

- 發展建立一個統計模式的過程，
- 依據統計數據配適一條合適的直線或曲線的過程。

— 迴歸分析步驟

1. 確定解釋變數X與反應變數Y；
2. 配適迴歸模式，估計模式參數；
3. 檢定模式顯著性與配適度；
4. 檢定模式妥當性；
5. 做進一步分析應用。

P.34

■ 4.2 迴歸模式建立

－ 執行目標

- 依據本所實際監測資料(統計數據)，配適一條合適的直線或曲線，建立地層下陷與地下水位間的迴歸模式(統計模式)。

－ 首要工作→選出適當變數

- 要配適一條合適的直線或曲線模式，必須已知或假設變數與變數間的關係式。
- 考量實際監測數值特性與土壤力學理論關係，選擇出適當的變數

P.35

■ 4.2.1 變數選擇

－ 反應變數Y的選擇

- 考量到「總累積下陷量」較能反應長時間地下水位變動產生應力對地層下陷之整體影響。

－ 解釋變數X的選擇

- (1)依據土壤力學理論的單向壓縮公式，推測地層下陷量與壓力對數值間較有線性相關；
- (2)考慮土層壓密尚未完成，覆土壓力造成的下陷主要隨時間增加而增大；
- (3)以地下水位下降值來反應地下水位作用力的影響，並考慮隨受壓時間增加而增加；
- (4)考慮地震會造成土壤壓縮，將芮氏5級以上地震之影響納入考量。

P.36

■ 4.2.2 模式建立

— 假設

- 在真實情況下，反應變數Y與解釋變數X間的關係是直線關係模式，

— 母體關係式

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon, \varepsilon \sim NID(0, \sigma^2)$$

- Y是總累積下陷量；
- X_1 是覆土壓力影響因子，以總累計時間長度對數值來反應；
- X_2 是地下水位作用力影響因子，以累計延時總水位下降對數值來反應；
- X_3 是重大地震作用力影響因子，將監測站所在地發生規模5級以上的地震，以指標變數來反應；
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 為母體參數；
- ε 是反應變數Y的隨機誤差。

P.37

- 假設樣本觀測值是從母體隨機抽樣得到，若此假設成立，則理論上此一樣本可反應並推估母體的實際情況

— 令樣本的多元直線迴歸模式為

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + e$$

- Y是總累積下陷量；
- X_1 是覆土壓力影響因子，以總累計時間長度對數值來反應；
- X_2 是地下水位作用力影響因子，以累計延時總水位下降對數值來反應；
- X_3 是重大地震作用力影響因子，將監測站所在地發生規模5級以上的地震，以指標變數來反應；
- b_0, b_1, b_2, b_3 為樣本模式迴歸係數，是母體參數 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的估計值；
- e是殘差。

P.38

■ 4.3 各地測站的迴歸模式

– 方法

- 運用統計軟體SPSS進行迴歸分析，就四地測站資料，以最小平方法估計模式係數，分別建立各自的迴歸模式。

– 臺中港迴歸模式

$$Y = 21.978 - 5.713X_1 - 0.54X_2 - 19.332X_3, R^2_{\text{adj}} = 0.916, F = 424.9$$

– 布袋港迴歸模式

$$Y = 1264.474 - 101.955X_1 - 69.949X_2 + 52.624X_3,$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0.931, F = 657.667$$

– 安平港迴歸模式

$$Y = 3.201 - 16.197X_1 + 3.127X_2, R^2_{\text{adj}} = 0.915, F = 349.684$$

– 大鵬灣迴歸模式

$$Y = 148.699 - 62.256X_1 + 36.631X_2, R^2_{\text{adj}} = 0.943, F = 914.984$$

P.39

五、模式檢定

■ 5.1 檢定方法

– 1.顯著性檢定

- 確定解釋變數X與反應變數Y之間是否有顯著的線性關係
- 透過F檢定或t檢定來進行

– 2.配適度檢定

- 確定模式具有說明能力
- R^2 或 R^2_{adj} 表示模式可說明Y變異的比例。

– 3.妥當性檢定

- 檢定基本假設是否符合：
→ 母體的Y與X是線性關係；隨機誤差 $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$

P.40

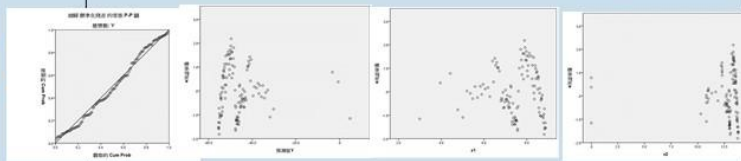
－ 模式妥當性檢定主要檢核以下幾項：

主要檢核項目	查核方法
(1)迴歸模式中X與Y的關係是否為線性關係；	查核「殘差與配適值Y之散佈圖」
(2)殘差項是否具有相同的變異數；	查核「殘差與配適值Y之散佈圖」
(3)殘差項是否彼此獨立；	查核「殘差與配適值Y之散佈圖」
(4)是否有離群值；	查核「殘差與配適值Y之散佈圖」與「常態機率圖」
(5)殘差不是常態分配；	查核「常態機率圖」
(6)是否仍有未納入模式中的其他重要影響變數。	查核「殘差與各解釋變數X之散佈圖」

P.41

■ 臺中港迴歸模式檢定與診斷

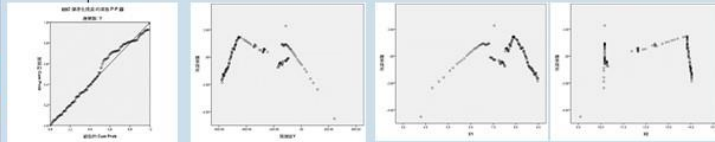
項目	檢定結果	診斷
顯著性	• $F=424.9$ ($P=0.000$): 模式顯著 • b_0的$t = 5.258$ ($P=0.000$)、b_1的$t = -5.653$ ($P=0.000$)、b_2的$t = -0.445$ ($P=0.657$)、b_3的$t = -1.583$ ($P=0.116$): X_2與X_3的影響不顯著	• 變數X_2、X_3的影響不顯著 • 建議再進一步進行變數選擇
配適度	• $R^2_{adj}=0.916$: 模式配適度高 • $b_1 = -5.713$、$b_2 = -0.54$、$b_3 = -19.332$: 影響變數的影響方向符合理論	• 檢定通過
妥當性	• 無3個標準差以外的離群值 • 原則符合線性關係 • 殘差項原則符合常態分配、彼此獨立的基本假設，但可能不符變異數為定值的基本假設。	• 殘差項可能不符變異數為定值的基本假設。 • 建議對變數Y做變數轉換，或改採加權最小平方法



P.42

■ 布袋港迴歸模式檢定與診斷

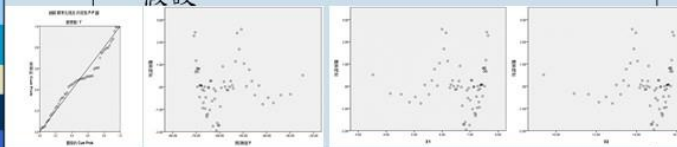
項目	檢定結果	診斷
顯著性	• $F=657.667$ ($P=0.000$)：模式顯著 • b_0的$t=28.327$($P=0.000$)、b_1的$t=-9.120$($P=0.000$)、b_2的$t=-13.493$($P=0.000$)、b_3的$t=2.680$ ($P=0.008$)：各變數的影響顯著	• 檢定通過
配適度	• $R^2_{adj}=0.931$：模式配適度高 • $b_1=-101.955$、$b_2=-69.949$、$b_3=+52.624$：地震力作用(X_3)的影響不符合理論。	• 變數X_3不配適 • 建議再查核變數的相關性，重新選擇適當變數
妥當性	• 離群值有1個 • 關係可能不符線性關係 • 殘差項可能不符合常態分配、彼此獨立且變異數相等的基本假設	• 建議再查核離群值 • 重新選擇適當變數或轉換為非線性模式、多項式模式。



P.43

■ 安平港迴歸模式檢定與診斷

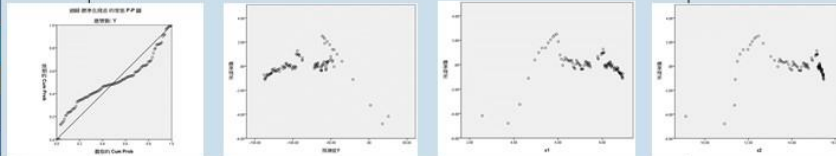
項目	檢定結果	診斷
顯著性	• $F=349.684$ ($P=0.000$)：模式顯著 • b_1的$t=-4.069$($P=0.000$)、b_0的$t=0.204$ ($P=0.839$)、b_2的$t=1.093$($P=0.657$)：可能是無常數項模式，地下水水位作用影響因子X_2的影響不顯著。	• X_2的影響不顯著，模式常數項可能為零。 • 建議再查核無常數項模式是否較佳，並查核影響變數X_2的選擇。
配適度	• $R^2_{adj}=0.915$：模式配適度高 • $b_1=-16.197$、$b_2=+3.127$：地下水水位下降(X_2)的影響不符合理論	• 影響變數X_2不配適 • 建議再查核各變數的相關性、各層地下水水位之相關性，重新選擇適當的變數
妥當性	• 無離群值 • 關係原則符合線性關係 • 殘差項原則符合彼此獨立、變異數相等的基本假設，但可能不符合常態分配之假設。	• 殘差項可能不符變異數為定值的基本假設。 • 建議進行模式影響變數的選擇查核



P.44

■ 大鵬灣迴歸模式檢定與診斷

項目	檢定結果	診斷
顯著性	• $F=914.984$ ($P=0.000$)：模式顯著 • b_0的$t = -6.714$ ($P=0.000$)、b_1的$t = -20.617$ ($P=0.000$)、b_2的$t = +12.113$ ($P=0.000$)：各影響變數的影響亦顯著	• 檢定通過
配適度	• $R^2_{adj}=0.916$：模式配適度高 • $b_1 = -5.713$、$b_2 = -0.54$、$b_3 = -19.332$：影響變數的影響方向符合理論	• 變數X_2的影響不配適 • 建議再查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性，重新選擇適當的變數。
妥當性	• 離群值有3個 • 關係可能不符線性關係 • 殘差項可能不符合常態分配、彼此獨立、變異數相等的基本假設。	• 建議先進行模式影響變數的選擇查核，確定模式後再次進行妥當性檢定。



P.45

六、結論與建議

- 本研究嘗試運用迴歸分析法，僅依據土壤力學理論與本所既有監測資料，發展出迴歸模式，
- 期能據以說明港區地層下陷與地下水位間的關聯性，並預測未來地層下陷的發展趨勢。
- 由於各迴歸模式均未通過檢定，建議後續：
 - － 先查核各變數的相關性、各層地下水位之相關性
 - － 重新選擇適當的變數以建立模式，
 - － 再依序進行顯著性、配適度與妥當性檢定。

P.46



簡報完畢
恭請指導